



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Auditbericht: 4. August 2010

Audit Feldschlösschen Getränke AG

Industry Audit im Rahmen des Forschungs-
projektes "Einstein goes Swiss"



SPF

Solartechnik
Prüfung
Forschung



HSR
HOCHSCHULE FÜR TECHNIK
RAPPERSWIL

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Industrial High-Temperature Solar Energy
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

Vela Solaris AG
Stadthausstrasse 125
CH-8400 Winterthur
www.velasolaris.com

Auftragnehmer:

Institut für Solartechnik SPF
Oberseestrasse 10
CH-8640 Rapperswil
www.solarenergy.ch

Autoren:

Heinz Marty, SPF Institut für Solartechnik, heinz.marty@solarenergy.ch
Bastian Schmitt, SPF Institut für Solartechnik, bastian.schmitt@solarenergy.ch
Elimar Frank, SPF Institut für Solartechnik, elimar.frank@solarenergy.ch

BFE-Bereichsleiter: S. Oberholzer

BFE-Programmleiter: P.Renaud

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 153819 / 102968

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
1 Firmenbeschreibung.....	4
2 Energieverbrauch und -bereitstellung	4
3 Relevante Prozesse	7
4 Prozessanalyse mit EINSTEIN.....	10
4.1 Abbildung des Produktionsbereichs „Sudhaus“	10
4.1.1 Abbildung verwendeter Energieträger	10
4.1.2 Abbildung der Prozesse im Sudhaus	11
4.1.3 Abbildung der Wärmeerzeuger	11
4.1.4 Abbildung des Wärmeverteilnetz.....	12
4.1.5 Abbildung des Wärmeübertragernetzes.....	12
4.2 Ergebnisse der Abbildung in EINSTEIN für das Proposal 1	12
4.2.1 Energieverbrauch	13
4.2.2 Wärmerückgewinnung Würzekühlung	13
4.2.3 Kesselaufzeit.....	14
4.3 Ergebnisse der Abbildung in EINSTEIN für Proposal 2 (HEN).....	14
4.4 Ergebnisse der Abbildung in EINSTEIN für Proposal 3 (Solar)	16
4.5 Bewertung der Ergebnisse	16
5 Weiterführende Betrachtungen	18
5.1 Zusätzliches Kesselspeisewasser	18
5.2 Abgastemperatur der Kessel	19
5.3 Tunnelpasteur	21
5.4 Brauwasserreserve.....	22
5.5 Bewertung der Ergebnisse	23

1 Firmenbeschreibung

Die Feldschlösschen Brauerei besteht seit 1876 und ist die grösste Brauerei der Schweiz. Neben dem Hauptsitz in Rheinfelden umfasst die Feldschlösschen Gruppe zwei weitere Brauereien in Freiburg und Sion sowie einen Mineralwasserabfüllbetrieb in Rhäzüns. Daneben besteht eine Vielzahl von Logistikzentren die über die Schweiz verteilt sind. Insgesamt vertreibt die Feldschlösschengruppe etwa 3,5 Mio. hl Getränke pro Jahr. Die Feldschlösschengruppe wurde im Jahre 2000 von der Carlsberg Breweries übernommen, dem viertgrössten Braukonzern der Welt. Für das Audit wurde der Hauptsitz in Rheinfelden gewählt, an welchem pro Jahr etwa 1,8 Mio. hl Bier gebraut und abgefüllt werden. Es wurde bewusst eine Firma aus dem Sektor Brauwesen für ein EINSTEIN Audit gewählt, da Brauereien einen sehr grossen Energiebedarf aufweisen und grossteils thermische Energie benötigen (ca. 75..80 % der verbrauchten Energie).



Abbildung 1: Brauerei Feldschlösschen in Rheinfelden

2 Energieverbrauch und -bereitstellung

Der Endenergieverbrauch des betrachteten Standortes beläuft sich auf gut 55 GWh pro Jahr. Der Hauptenergieträger ist Erdgas. Zusätzlich nutzt die Brauerei zur Wärmebereitstellung Biogas, welches bei der Vorklärung der anfallenden Brauereiabwässer gewonnen wird. Ausserdem wird der bei der Entalkoholisierung von Bier anfallende Alkohol als Brennstoff genutzt. Als vierter Energieträger kann Heizöl zur Wärmeversorgung verwendet werden, was jedoch lediglich zum Kompensieren von Lastspitzen eingesetzt wird, um bei Bedarf den Gasbezug zu minimieren. Knapp ein Drittel der verbrauchten Endenergie geht auf

Strom zurück. Die Anteile der einzelnen Energieträger sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Auflistung der verwendeten Energieträger und der jährlichen Verbräuche (Quelle: Feldschlösschen)

	Verbrauch	Heizwert	Energieverbrauch	Anteil
Erdgas	2,406,000 [Nm ³]	11.40 [kWh/Nm ³]	27,428 [MWh]	49%
Heizöl	65,041 [l]	10.67 [kWh/l]	694 [MWh]	1%
Biogas	793,227 [m ³]	7.95 [kWh/m ³]	6,306 [MWh]	11%
Alkohol	660,300 [l]	6.13 [kWh/l]	4,048 [MWh]	7%
Strom	17,088 [kWh]	1.00 [kWh]	17,088 [MWh]	31%
Summe	55,564 [MWh]			

Die Bereitstellung der thermischen Energie erfolgt mit drei 10 MW Kesseln (Baujahr 1969), welche teilweise mit allen der aufgeführten Energieträger betrieben werden können. Die Energieversorgung der einzelnen Prozesse erfolgt über ein Dampfnetz mit etwa 165°C sowie ein Druckheisswassernetz mit einer Vorlauftemperatur von etwa 150°C. Sowohl das Dampf- als auch das Heisswassernetz verfügen über zwei Stränge, an denen unterschiedliche Verbraucher angeschlossen sind. An das Dampfnetz sind das Sudhaus und die Entalkoholisierungsanlage angeschlossen. Ein Strang des Heisswassernetzes versorgt die Flaschen- und Dosenabfüllung sowie das Lager, der andere Strang dient der energetischen Versorgung der Kegabfüllung, der Warmwasserbereitstellung sowie weiteren Fabrikationseinrichtungen. Die Verschaltung im Kesselhaus ist Abbildung 2 zu entnehmen. Zwei der drei Kessel können mit Erdgas, Biogas oder Heizöl betrieben werden und weisen dabei eine Nennleistung von ca. 8 MW_{th} auf. Der dritte Kessel kann mit Erdgas, Biogas oder Alkohol betrieben werden, wobei die Nennleistung im Alkoholmodus auf etwa 5 MW_{th} sinkt. Während den Produktionszeiten sind durchschnittlich zwei Kessel in Betrieb, ohne den Grossabnehmer Sudhaus reicht in der Regel ein Kessel aus. In diesem Fall wird ein weiterer Kessel nur zur Lastspitzenkompensation zugeschaltet. Druck und Temperatur des Dampfnetzes sind abhängig von den aktiven Verbrauchern der Produktion. Die höchsten Druckanforderungen stellt die Eindampfanlage mit 7.5 bar, respektive 165..170°C. Läuft dieser Prozessschritt nicht, wird ein Dampfdruck von 4.5 bar gefahren, der für die Produktion innerhalb des Sudhauses ausreichend ist. Wenn auch dieses nicht in Betrieb ist, liegt der Solldruck bei 3.5 bar (ca. 140°C), da der Dampf lediglich zur Heisswasserbereitstellung genutzt wird. Im Wochenendbetrieb ohne Produktion

wird der Druck weiter auf 3 bar abgesenkt. Der Kondensatrücklauf mit etwa 95°C geht in die thermische Entgasung und wird von dort über den Economiser in die Heisswasserkaskade geleitet. Die thermische Entgasung verläuft bei etwa 0.4 bar Überdruck und 105°C. Das in der Heisswasserkaskade befindliche Wasser wird stetig durch eine direkte Dampfzuführung auf einer Temperatur von etwa 140..160°C (abhängig vom Dampfdruck) gehalten. Die Heisswasserkaskade speist neben dem Heisswassernetz auch die Kessel. Die Rücklauftemperatur des Heisswassernetzes liegt bei ungefähr 115°C und kann dem Vorlauf bei entsprechender Temperatur in der Kaskade zur Erzielung der Solltemperatur beigemischt werden. Findet keine Beimischung statt, kann der Rücklauf durch den Economiser geführt werden (zweite Priorität nach Kondensat und zusätzlichem Kesselspeisewasser). Der Betriebsdruck des Heisswassernetzes liegt bei etwa 7 bar. Die Abgastemperatur der Kessel liegt nach der Durchleitung durch die Economiser bei etwa 120°C. Pro Jahr werden ca. 12'000 m³ zusätzliches Kesselspeisewasser benötigt, welche zusammen mit dem Kondensatrücklauf der thermischen Entgasung zugeführt werden.

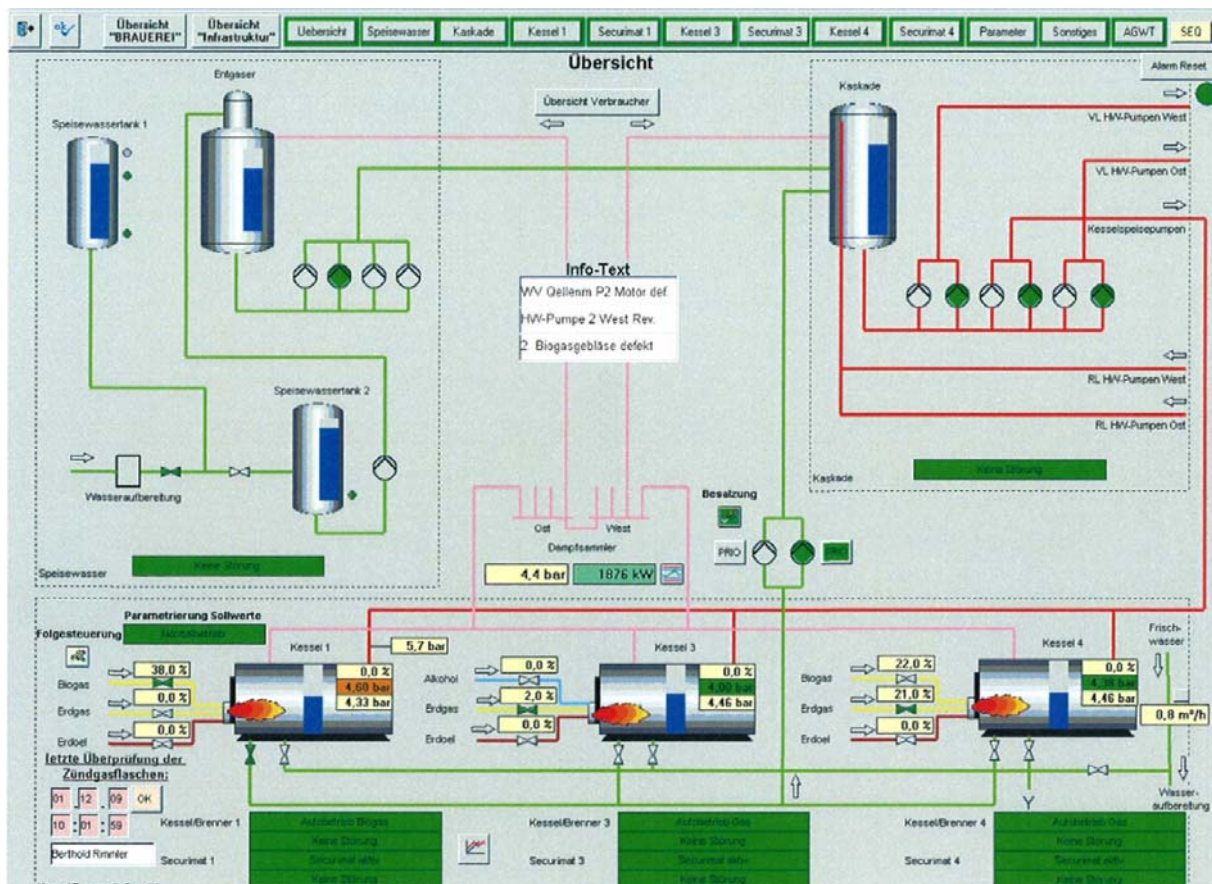


Abbildung 2: R&I Schema Kesselhaus (Quelle: Feldschlösschen)

Zur Versorgung der Produktion mit Prozesskälte sind zwei Kältemaschinen installiert. Der Kältebedarf des Gär- und Lagerkellers wird durch eine 3.3 MW

Kältemaschine gedeckt (COP 4.5). Die Kühlung des Bieres erfolgt durch Ammoniakdirektverdampfung im Mantel der Lagerbehälter (sogenannte ZKT - Zylindro-Konische Tanks). Eine weitere Kältemaschine mit 1.2 MW Kälteleistung (COP 4) versorgt über einen Glykolkreislauf den Biertiefkühler, Entalkoholisierung und CO₂-Rückgewinnung.

3 Relevante Prozesse

Die Produktion innerhalb einer Brauerei lässt sich in vier Bereiche aufteilen: Sudhaus (Herstellung der Würze), Gär- und Lagerkeller (Reifung des Bieres), Flaschenkeller (Reinigung und Abfüllung von Flaschen, Dosen und Kegs) sowie die Versorgungseinheiten (Wärme, Kälte, Druckluft). Mit etwa 50 % wird ein Grossteil der thermischen Energie innerhalb einer Brauerei im Sudhaus verbraucht.

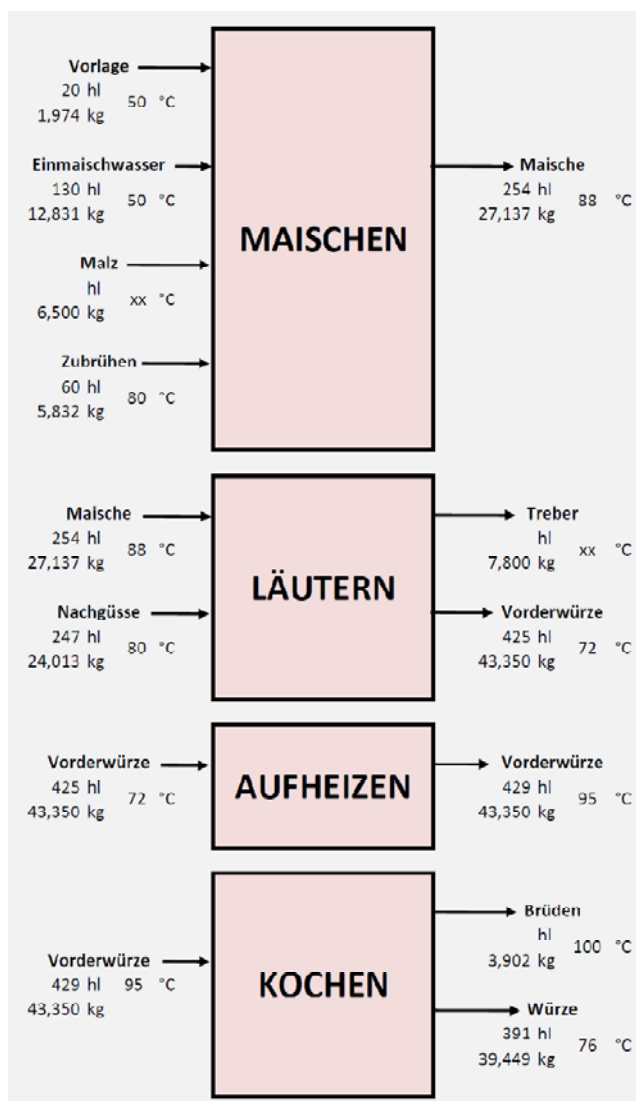


Abbildung 3: Produktionsablauf im Sudhaus

Im Sudhaus erfolgt zunächst das Maischen, wobei Heisswasser mit Malz vermischt und über ein definiertes Zeit-Temperatur-Profil aufgeheizt wird. Beim Läutern erfolgt die Trennung von Trebern (feste Rückstände) und Vorderwürze. Dabei wird der Treber mit heissem Wasser ausgewaschen. Anschliessend wird die Vorderwürze aufgeheizt und gekocht. Dabei wird eine definierte Menge Wasser verdampft. Die entstehenden Brüden werden mechanisch verdichtet und nach einer Kondensateinspritzung als Heizmedium für den Kochprozess verwendet. Die grossen Heisswasser-ströme welche beim Maischen und Läutern verwendet werden, werden im Sudhaus durch die Wärmerückgewinnung bei der Würzekühlung erwärmt. Dabei muss die Würze nach dem Whirlpool von etwa 95°C auf Anstelltemperatur

(18°C) gekühlt werden. Dies geschieht zweistufig mit Kalt- und Eiswasser. In der ersten Stufe wird teilenthärtetes Brauwasser mit 15°C zur Kühlung der Würze verwendet und dabei auf etwa 85°C erwärmt. Das erwärmte Wasser wird in der Brauwasserreserve zwischengespeichert. Diese besteht aus zwei parallel verschalteten Speichern mit jeweils 250 m³ Volumen. Die Temperatur der Brauwasserreserve liegt bei 80..85°C. Zur Kompensation von Wärmeverlusten verfügt die Brauwasserreserve über eine Nachheizung, welche von dem Heisswassernetz gespeist wird.

Neben dem Sudhaus ist die Entalkoholisierungsanlage ein weiterer Grossverbraucher bei der Feldschlösschenbrauerei. Dieser Prozessschritt wird wie das Sudhaus über das Dampfnetz versorgt. Dabei wird das Bier mittels Vakuumdestillation (mehrstufige Dünnschichtverdampfung) entalkoholisiert. Der dritte grosse thermische Energieverbraucher ist der Tunnelpasteur in der Abfüllhalle. Alle Biermischgetränke, alkoholfreien Biere sowie alle in Dosen abgefüllten Biere müssen den Tunnelpasteur durchfahren (Kapazität 48'000 Flaschen pro Stunde). Der Tunnelpasteur sowie alle weiteren Verbraucher in der Abfüllhalle sind an das Heisswassernetz angeschlossen. Normales Flaschenbier durchläuft vor der Abfüllung den Kurzzeiterhitzer. In diesem Plattenwärmeübertrager wird das Bier auf Pasteurisierungstemperatur gebracht. Hierbei wird lediglich für die letzten 10 K ein Heizmedium (Heisswasser) benötigt, der Rest erfolgt durch die Gegenstromführung des abzukühlenden Bieres. Weitere thermische Energieverbraucher sind die Flaschenwaschmaschine (Heisshalten der Reinigungslauge bei 80°C, geschätztes Laugenvolumen 50 m³), die Fassabfüllung, die Cleaning-in-Place (CIP) Anlagen und die Filtration. Bei der Filtration müssen die verwendeten Kerzenfilter sterilisiert werden. Hierzu wird eine unbekannte Menge enthärtetes Wasser vor Ort über das Heisswassernetz auf 80..90°C aufgeheizt.

Die Produktionszeiten der einzelnen Brauereibereiche sind sehr unterschiedlich. Mit sechs Produktionstagen in drei Schichten ist die Abfüllung der Einweggebinde am häufigsten in Betrieb. Ebenfalls im Dreischichtbetrieb, mit vier bis sechs Tagen pro Woche erfolgt die Würzeherstellung im Sudhaus. Die Bierabfüllung in Kegs läuft durchschnittlich an fünf Tagen und in zwei Schichten. An lediglich zwei Tagen pro Woche und in zwei Schichten werden Mehrwegflaschen abgefüllt. Die Produktion im Gär- und Lagerkeller verläuft automatisiert konstant über die Woche. Nach dem Umpumpen der Würze von den Gär- in die Lagertanks sowie von den Lagertanks in Drucktanks, werden die leeren Tanks mittels CIP gereinigt. Die Behälter im Sudhaus werden einmal pro Woche gecippt, der Aussenkocher zweimal pro Woche. Entsprechend der genannten

Produktionszeiten bei der Abfüllung verhält sich das Produktsortiment der Feldschlösschenbrauerei (vgl. Abbildung 4).

Produktaufteilung

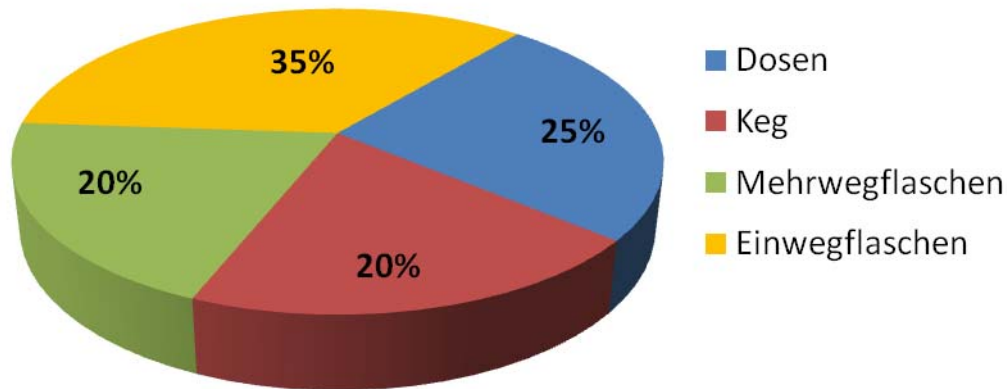


Abbildung 4: Produktaufteilung der Bierproduktion nach Gebinde

Das Produktionsprofil über das Jahr zeigt Abbildung 5. Auf Basis der vorhandenen Informationen wird sich der Ausstoss der Brauerei in 2009 auf etwa 1.8 Mio. hl, verteilt auf schätzungsweise 4200 Sude belaufen. Das Produktionsprofil weist eine leichte Zunahme in den wärmeren Sommermonaten auf.

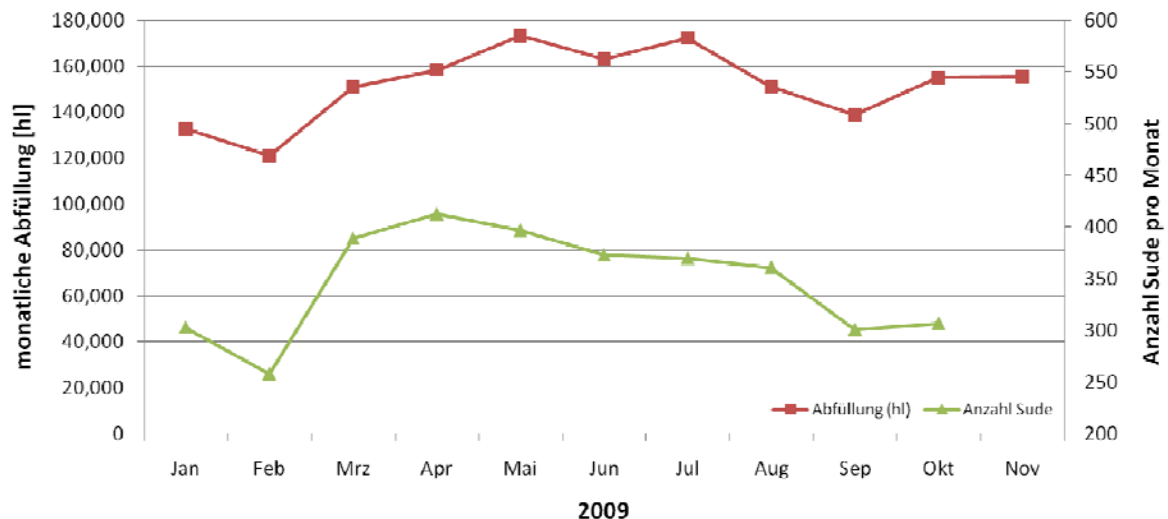


Abbildung 5: Produktionsprofil der Feldschlösschenbrauerei

4 Prozessanalyse mit EINSTEIN

Bei der Abbildung in EINSTEIN wird zunächst der energetische Ist-Zustand der Brauerei dargestellt. Auf Basis des Ist-Zustandes können unterschiedliche Massnahmen wie zum Beispiel Prozessoptimierung, Nutzung von Abwärme oder Einsatz erneuerbarer Energien zu einem effizienteren Energiekonzept führen. Die unterschiedlichen Energiekonzepte, in EINSTEIN Proposals genannt, werden berechnet und können anschliessend bewertet und verglichen werden.

4.1 Abbildung des Produktionsbereichs „Sudhaus“

Zur Identifikation von Energieeffizienzmassnahmen und den Einsatzmöglichkeiten erneuerbarer Energien wurden die vorhandenen Daten der Wärmebereitstellung und des Sudhauses der Brauerei in EINSTEIN abgebildet. Dafür werden zunächst die für die Produktion im Sudhaus benötigten Energieträger entsprechend der Verbrauchsdaten der Brauerei aufgelistet, bevor die Abbildung der einzelnen Prozesse im Sudhaus, der verwendeten Wärmeerzeuger sowie des Wärmeverteilnetzes und des existierenden Wärmeübertragernetzes erläutert werden.

4.1.1 Abbildung verwendeter Energieträger

Tabelle 2: In EINSTEIN abgebildete Energieträger und deren jährlicher Verbrauch

Energieträger	Endenergieverbrauch		Anteil
Erdgas	26'280	MWh	72%
Biogas	6'120	MWh	17%
Alkohol	3'600	MWh	10%
Strom (Brüdenverdichter)	500	MWh	1%
SUMME	Ca. 36'500	MWh	100%

Der in Tabelle 2 aufgelistete jährliche Verbrauch der einzelnen Energieträger entspricht dem Endenergieverbrauch für Wärmebereitstellung. Die Verwendung von Strom für nicht thermische Anwendungen (17MWh/a, vgl. Tabelle 1) wird in EINSTEIN nicht in die Analyse eingebunden und daher in der vorliegenden Studie auch nicht weiter betrachtet.

Die Daten in Tabelle 2 stammen aus Verbrauchsangaben der Brauerei, die in EINSTEIN einschliesslich vorgegebbarer Leitungsverluste, Kesselwirkungsgrade etc. auf Plausibilität und Konsistenz überprüft werden.

4.1.2 Abbildung der Prozesse im Sudhaus

Auf Basis des in Abbildung 3 dargestellten Produktionsablaufs im Sudhaus resultiert nach der Abbildung in EINSTEIN der in Tabelle 3 dargestellte Energiebedarf der Prozesse (Useful Process Heat, UPH). Die Prozesse Maischen, Aufheizen und Kochen Anfahren werden durch das Dampfnetz energetisch versorgt. Dem Brüdenverdichter wird elektrische Energie zugeführt, während die Aufbereitung des Brauwassers durch die Wärmerückgewinnung mit der heissen Würze erfolgt.

Tabelle 3: In EINSTEIN definierte Prozesse und deren jährlicher Energiebedarf

Prozess	UPH	
Aufheizen Brauwasser	14'000	MWh
Maischen	3'790	MWh
Aufheizen (Kochen)	4'660	MWh
Kochen Anfahren	1'650	MWh
Kochen Brüdenverdichter	80	MWh
SUMME (ohne WRG)	24'170	MWh
SUMME (mit WRG)	12'870	MWh

4.1.3 Abbildung der Wärmeerzeuger

Tabelle 4: In EINSTEIN definierte Wärmeerzeuger und deren Leistung

Kessel	Nennleistung	
Erdgaskessel	8'000	kW
Biogaskessel	8'000	kW
Alkoholkessel	5'000	kW
Brüdenverdichter	160	kW

Alle drei Kessel der Brauerei wurden in EINSTEIN modelliert, allerdings mit der Einschränkung, dass jeder nur mit einem Brennstoff betrieben wird. Ein Mischbetrieb, wie er bei der Brauerei möglich ist, kann in EINSTEIN nur indirekt über den Parameter „Belastungsgrad“ definiert werden. Dadurch wird das reale Verhältnis zwischen Biogas, Erdgas und Alkohol eingehalten.

4.1.4 Abbildung des Wärmeverteilnetz

Tabelle 5: In EINSTEIN definierte Leitungen mit dem jeweiligen Temperaturniveau

Leitung	Vorlauftemperatur	
Dampfnetz	160	°C
Leitung nach Brüdenverdichter	150	°C

Das abgebildete Dampfnetz ist die primäre Energieversorgung der Brauerei und wird von den Dampfkesseln gespeist. Die Temperatur kann durchschnittlich mit 160°C angenommen werden. Wie im Kapitel „Energiebereitstellung“ beschrieben, variiert die tatsächliche Temperatur in Abhängigkeit der aktiven Prozesse. Die Leitung nach dem Brüdenverdichter ist real in dieser Art nicht vorhanden und wurde lediglich implementiert, um die übertragene Energie des Brüdenverdichters bilanzieren zu können. Das Heisswassernetz der Brauerei wurde nicht abgebildet, da die an dieses Netz angeschlossenen Verbraucher in EINSTEIN nicht abgebildet wurden.

4.1.5 Abbildung des Wärmeübertragernetzes

Tabelle 6: In EINSTEIN definierter Wärmeübertrager für die Würzekühlung

Wärmerückgewinnung	T primär - sekundär	
WRG Würzekühlung	95/18 – 15/85	°C

Für den Produktionsbereich „Sudhaus“ wurde das existierende Wärmeübertragernetz abgebildet. Das kalte Brauwasser mit einer durchschnittlichen Temperatur von 15°C wird im Gegenstrom mit der heißen Würze auf 85°C erwärmt. Dabei kühlt sich die Würze von 95°C auf 18°C ab. Diese Werte können über das Jahr als konstant angenommen werden. Die aufgeführten Temperaturdifferenzen dienen zusammen mit dem angesetzten Volumenstrom als Auslegungsgrundlage des Wärmeübertragers in EINSTEIN.

4.2 Ergebnisse der Abbildung in EINSTEIN für das Proposal 1

Mit den zuvor erläuterten Daten wurde der Ist-Zustand der prozessbezogenen thermischen Energieflüsse des Produktionsbereichs „Sudhaus“ der Brauerei in EINSTEIN abgebildet und simuliert. Die Ergebnisse des „Proposal 1“ werden im Folgenden mit den Ausgangsdaten verglichen. Bei diesem Proposal werden noch keinerlei Optimierungsvorschläge eingesetzt, es ist lediglich ein Nachsimulieren des vorab vorgegebenen und auf Plausibilität überprüften Ist-Zustandes. Somit

sollte das Proposal 1 im Folgenden als Referenz verwendet werden können, um Proposal mit Anpassungsvorschlägen (WRG, Einbindung erneuerbarer Energien etc.) bewerten zu können.

4.2.1 Energieverbrauch

Tabelle 7: In EINSTEIN berechnete Werte des jährlichen Energieverbrauchs der einzelnen Energieträger

Energieträger	Energieverbrauch		Anteil
Erdgas	24'900	MWh	79%
Biogas	5'200	MWh	17%
Alkohol	1'090	MWh	4%
Strom (Brüdenverdichter)	0	MWh	0%
SUMME	31'380	MWh	100%

Der in Tabelle 7 dargestellt und von EINSTEIN simulierte Energieverbrauch unterscheidet sich von den in Tabelle 2 aufgelisteten Werten. Mit den in EINSTEIN abgebildeten Prozessen und Kesseln sowie dem Wärmeverteilnetz rechnet das Programm einen Prozesswärmebedarf von lediglich 31'380 MWh. EINSTEIN identifiziert somit ein theoretisches Einsparpotential von 5'120 MWh, ohne dass Veränderungen an den installierten Komponenten vorgenommen werden. Dieses „Einsparpotential“ ist unerwartet hoch und konnte nicht abschliessend verifiziert werden. Es wird vermutet, dass es durch die EINSTEIN-Priorisierung der Kessel zustande kommt, bei welcher der Energieträger Erdgas aufgrund des besseren Wirkungsgrads vor der Verwendung von Alkohol bevorzugt wird. Dies zeigt sich an dem Anteil des Energieträgers Erdgas, der sich in dem Proposal verglichen zur Ausgangslage (vgl. Tabelle 2) vergrössert hat, wodurch der Anteil von Alkohol gesunken ist. Theoretisch ist dies denkbar, allerdings ist der Energieträger Alkohol in diesem Falle ein Reststoff, der während der Produktion anfällt und nicht direkt mit der Nutzung von Erdgas vergleichbar ist. Es war für die Analyse nicht möglich, die relativen Anteile der Energieträger exakt den Angaben in Tabelle 2 anzupassen, so dass im Weiteren von Proposal 1 als Referenz ausgegangen werden musste.

4.2.2 Wärmerückgewinnung Würzekühlung

Der bestehende Wärmeübertrager der Würzekühlung wird in EINSTEIN basierend auf den in Tabelle 6 definierten Temperaturdifferenzen und den manuell eingestellten Durchflussraten bei Ablauf Würzekühlung und Zulauf

Brauwasseraufbereitung berechnet. Es resultiert eine neue primärseitige Rücklauf­temperatur von 20°C anstelle von 18°C (EINSTEIN verwendet ein dT_{min}^1 von 5 K was nicht geändert werden kann. Desweiter­n werden die Übertragungsleistung von 3570 kW bei einer Oberfläche von 208 m² berechnet. Die übertragene Energie summiert sich über das Jahr auf 11'300 MWh. EINSTEIN berechnet den Energiebedarf der Prozesse, welcher über das Dampfnetz bereit­gestellt werden muss (UPHproc), somit auf 12'870 MWh (vgl. Tabelle 3).

4.2.3 Kessellaufzeit

Tabelle 8: In EINSTEIN berechnete Auslastung der Kessel

Kessel	Auslastung	
Erdgas	74.2	%
Biogas	100.0	%
Alkohol	86.8	%

Da EINSTEIN Biogas als ökologischsten und geeignetsten der verwendeten Energieträger identifiziert, wird Biogas bevorzugt zur Wärmeerzeugung eingesetzt. Die Alkohol- und Erdgaskessel werden nur dann zugeschaltet, wenn die Leistung des Biogaskessels nicht ausreicht. Dies zeigt, dass nur beschränkt Einfluss genommen werden kann, welcher Energieträger für die Berechnung in EINSTEIN verwendet werden soll.

4.3 Ergebnisse der Abbildung in EINSTEIN für Proposal 2 (HEN)

In einem zweiten Proposal wurde analysiert, wie ein optimiertes Wärmeübertragernetzwerk für den Produktionsbereich „Sudhaus“ ausgelegt werden könnte. Dabei wird der bereits bestehende Wärmeübertrager der Würzekühlung auch wieder Bestandteil des Wärmeübertragernetzwerkes (HEN = heat exchanger network) sein. Während dieser Analyse steht dem Benutzer offen, ob die bestehenden Wärmeübertrager in das neue HEN integriert werden sollen oder nicht. Dies ist eine sehr hilfreiche und wichtige Option, falls bestehende HEN erneuert werden sollen.

¹ Temperaturdifferenz der kalten oder heissen Anschlüsse am Wärmeübertrager

Tabelle 9: Mit EINSTEIN optimiertes Wärmübertragernetz

	Name	Power [kW]	Size storage tank [m³]	Hot Medium	T1 hot med. [°C]	T2 hot med. [°C]	Cold medium	T3 cold med. [°C]	T4 cold med. [°C]	surface area [m²]	inv. cost [EUR]	oper. cost [EUR]
1	NewHX10	23.42	0.00	Alcoholkessel	82.00	68.76	Maischen	58.76	58.93	15.38	34426	2777
2	NewHX7	239.23	0.00	BioGaskessel	108.48	61.00	Maischen	56.00	57.77	124.47	733180	59143
3	NewHX8	120.64	0.00	BioGaskessel	105.00	81.06	Maischen	57.87	58.76	37.09	558067	45017
4	NewHX9	44.77	0.00	Alcoholkessel	107.31	82.00	Laeutern	72.00	72.20	22.99	113432	9150
5	NewHX4	279.59	0.00	Alcoholkessel	260.39	102.31	KochenAnfahre	97.31	98.49	63.62	216538	17467
6	NewHX5	8.39	0.00	Brudenverdich	238.44	103.45	KochenAnfahre	98.45	98.49	2.13	3360	271
7	NewHX6	296.99	0.00	BioGaskessel	167.43	108.48	KochenAnfahre	98.48	99.73	101.06	420412	33913
8	WRG	3567.28	0.00	KochenBruden	95.00	20.00	Brauwasserauf	15.00	83.00	208.20	0	0
9	NewHX2	13.27	0.00	BioGaskessel	170.07	167.43	KochenBruden	101.72	102.00	2.04	4080	329
10	NewHX3	562.04	0.00	Gaskessel	317.95	100.00	KochenAnfahre	95.00	97.37	101.36	343122	27678

Das Ergebnis der Optimierung des HEN zeigt Tabelle 9, in welcher in jeder Zeile ein Wärmeübertrager (WT) beschrieben ist. In Zeile 9 ist der bestehende Wärmeübertrager der Würzekühlung aufgeführt. An der Übertragungsleistung in Spalte 2 und an der Menge der vom WT übertragener Energie ist ersichtlich, dass dort auch das grösste Potential ist. Der angesprochene WT (Tabelle 9: Mit EINSTEIN optimiertes WärmübertragernetzTabelle 9, Zeile 9) überträgt mehr als 97% der gesamthaft übertragener Energiemenge, welche von allen in Tabelle 9 aufgelisteten WTs übertragen wird. Aus der im EINSTEIN integrierten Pinchanalyse resultieren acht weitere neue Wärmeübertrager. Der Wärmeübertrager NewHX1 ist der zweitgrösste gefolgt von viele mittelgrossen. Die Prozesse zwischen denen die Energie übertragen wird, sind in Spalte 4 und 7 dargestellt. Ist bekannt, dass von Prozess A nach Prozess B keine Wärme übertragen werden kann (z.B. aufgrund einer grossen räumlichen Entfernung), besteht die Option den entsprechenden Wärmeübertrager aus der Liste zu entfernen und das Proposal neu zu berechnen. Investitions- und Unterhaltskosten sind aus einer Datensammlung berechnet und werden in den letzten 2 Spalten dargestellt.

Alle Wärmeübertrager zusammen weisen eine jährliche Wärmerückgewinnung von 11'550 MWh auf. Am WT Würzekühlung wird am meisten Wärme zurückgewonnen (11'310 MWh). Die jährliche Ertragsumme der restlichen WTs beläuft sich entsprechend auf 240 MWh. Die Investitionskosten der neuen WTs weist EINSTEIN mit 3.6 Mio. CHF aus. Jährliche Kosteneinsparung, gerechnet mit einem Energiepreis von 100 CHF/MWh, kommen auf 24'000 CHF. Aufgrund dieser Abschätzung würde es sich nicht rechnen, das HEN im aufgezeigten Konzept zu erweitern.

Auch im Bereich der Energieversorgung hat die Feldschlösschen Brauerei Wärmeübertrager installiert. Die Kessel sind mit Economisern ausgestattet, sodass ein Teil der Abgasabwärme genutzt werden kann. Dies in EINSTEIN zu modellieren, konnte in angemessener Zeit jedoch nicht realisiert werden. So ist auch zu bedenken, dass die Wärmeübertrager NewHX 4-9 genauer zu analysieren sind.

4.4 Ergebnisse der Abbildung in EINSTEIN für Proposal 3 (Solar)

Der Energiebedarf der Feldschlösschen Brauerei ist sehr gross, wobei die benötigte thermische Energie in einem Temperaturbereich von 20-160°C anfällt. Eine Möglichkeit der Senkung des Energieverbrauchs ist die Integration einer thermischen Solaranlage. EINSTEIN berechnet für eine Anlage mit einer maximal zu installierenden Kollektorbruttofläche von 300 m² (Limit: Verfügbare geeignete Fläche), einem Anstellwinkel von 60°, Südausrichtung und einer solaren Einstrahlung von 1100kWh/m²/a folgende Resultate für angestrebte Deckungsgrade von 10%, 1%, 0.5% und 0.1%.

Tabelle 10: Resultate von Simulation einer Solaranlage

Proposal	Soll solarer Deckungsgrad für EINSTEIN Solaranlagen Auslegung	Wärmerückgewinnung von Kältemaschinen	Energiebedarf für Prozesse	Solarer Deckungs-grad / Kollektorbruttofläche	Spezifischer Ertrag pro m ² Kollektorbruttofläche
3.1	10%	Ja (Würzekühlung)	12 GWh/a	0.57% / 227m ²	670 kWh/m ²
3.2	1%	Ja (Würzekühlung)	12 GWh/a	0.57% / 227m ²	670 kWh/m ²
3.3	0.5%	Ja (Würzekühlung)	12 GWh/a	0.57% / 227m ²	670 kWh/m ²
3.4	0.1%	Ja (Würzekühlung)	12 GWh/a	0.57% / 227m ²	670 kWh/m ²

Obwohl EINSTEIN variierende solare Deckungsgrade vorgegeben werden, dimensioniert EINSTEIN immer die gleiche Solaranlage (vgl. Tabelle 10). Es wurde erwartet, dass aufgrund der variierenden Vorgabe für den solaren Deckungsgrad aus der EINSTEIN-Berechnung auch verschieden grosse Kollektorfelder resultieren. Die Kollektorbruttofläche wird in jedem Proposal mit 227 m² vorgeschlagen, obwohl 300 m² verfügbar wären. Eigene Abschätzungen ergaben, dass mit einer verfügbaren Fläche von 300 m² ein solarer Deckungsgrad von 1 % erreicht werden müsste und 0.5% bzw. 0.1% solarer Deckungsgrad mit entsprechend kleinerer Kollektorbruttofläche. Diese Berechnung funktionierte also im dargestellten Fall nicht zufriedenstellend. Der spezifische Kollektorfeldertrag ist mit 670kWh/m²/a zwar recht hoch, jedoch für diese Anwendung (die Brauwasservorwärmung mit geringem solaren Deckungsgrad von 0.57%) nicht unplausibel.

4.5 Bewertung der Ergebnisse

Durch die Abbildung in EINSTEIN konnten die Prozesse des Sudhauses der Feldschlösschen-Brauerei modelliert werden. Die exakte Deklaration von Primary Energy, Final Energy, Useful Supply Energy, Useful Process Energy und Useful Process Energy for Processes hat den Energiefluss übersichtlich strukturiert.

Nach Definition aller Komponenten, Leitungen und Verbrauchszahlen von Energieträgern hat sich herausgestellt, dass es (auch mit Hilfe von EINSTEIN) sehr zeitaufwendig und ineffizient war, die effektiven Energiebedarfszahlen der einzelnen Prozesse mit EINSTEIN zu berechnen. Dies war in diesem Ausmass nicht zu erwarten, da die EINSTEIN-Software zur Analyse genau solcher Objekte wie Feldschlösschen entwickelt wurde.

Im Rahmen der Modellierung in EINSTEIN ist es gelungen, ein Wärmeübertragernetz auszubauen, die Wärmerückgewinnung zu integrieren und den Energieverbrauch einzelner Prozesse aufzuzeigen. Die Auslegung des Wärmeübertragernetzwerkes war aufschlussreich und hilfreich. EINSTEIN zeigt die maximal einzusparende Energie auf, auch unter Einbezug bestehender Wärmeübertrager. Überzeugt hat auch die Möglichkeit, benutzerspezifische Anpassungen in die Auslegung einzubringen, wie z.B. bestimmte vorgeschlagene Wärmeübertrager zu entfernen oder andere dafür einzusetzen. Mit EINSTEIN konnte jedoch keine HEN-Optimierung für den analysierten Bereich empfohlen werden. Dabei müsste jedoch genauer analysiert werden, ob die Investitionskosten von EINSTEIN realistisch angesetzt werden. Bessere Werte für die Investitionskosten bedarf jedoch einer umfangreicheren Recherche.

Weniger überzeugend bei der Benutzung von EINSTEIN war der Wizard „Prozessoptimierung“. Dieser Wizard hat nicht wie zu Beginn vermutet direkt das Modell angepasst und aktiv eine Optimierung vorgeschlagen, sondern weist lediglich mit einem textbasierten Antwortkatalog auf geeignete Technologien in der entsprechenden Branche hin. Es wurden daraufhin keine Anpassungen in EINSTEIN vorgenommen bzw. umgesetzt.

Leider ebenfalls nicht überzeugend in der EINSTEIN-Analyse sind Resultate für die Dimensionierungswerte der Solaranlage. Der Ertrag der ausgelegten Solaranlage ist optimistisch hoch, jedoch schätzungsweise nicht höher als 20% über eigenen Erfahrungswerten. Die Dimensionierung der Anlagekomponenten variiert nicht wie erwartet bei Variation des solaren Deckungsgrades (vgl. Tabelle 10). EINSTEIN rechnet einen Solarertrag von 670kWh/m²/a resp. 152 MWh/a. Für die empfohlene Grösse von 227 m² Kollektorbruttofläche rechnet EINSTEIN mit Investitionskosten von 207'000 CHF. Mit 100 CHF pro eingesparter MWh Wärme kommen die finanziellen Einsparungen jährlich auf 15'200 CHF, woraus eine Paybackzeit von unter 13 Jahren resultiert.

5 Weiterführende Betrachtungen

Da im Rahmen der Datenerhebung und -auswertung einige aus energietechnischer Sicht sehr interessante Aspekte deutlich wurden, erfolgte parallel zu den Arbeiten mit EINSTEIN eine Untersuchung der einzelnen Punkte. Diese betreffen:

- das zusätzlich benötigte Kesselspeisewasser,
- die Abgastemperatur der Kessel,
- den Tunnelpasteur und
- den Brauwasserkreislauf.

5.1 Zusätzliches Kesselspeisewasser

Nach Angaben der Brauerei verbraucht das Kesselhaus pro Jahr etwa 12'000 m³ zusätzliches Kesselspeisewasser. Dabei wird Kaltwasser mittels Wärmerückgewinnung von den Kompressoren von 15°C (Jahresmittel) auf 35°C erwärmt. Das 35°C warme Wasser gelangt anschliessend in die thermische Entgasung. In der thermischen Entgasung wird das Kesselspeisewasser auf 105°C erwärmt, sodass sich die Inertgase lösen können. Nach Angaben der Brauerei ist der Verlust an Dampf, welcher durch das zusätzliche Kesselspeisewasser ausgeglichen werden muss, durch die Eindampfanlage und den Kochprozess bedingt. Bei der ersten Stufe der Alkoholeindampfung wird der Sattedampf durch eine direkte Einspritzung stofflich genutzt. Bei der Kochung wird nach der Verdichtung Kondensat in den überhitzten Brüden eingespritzt.

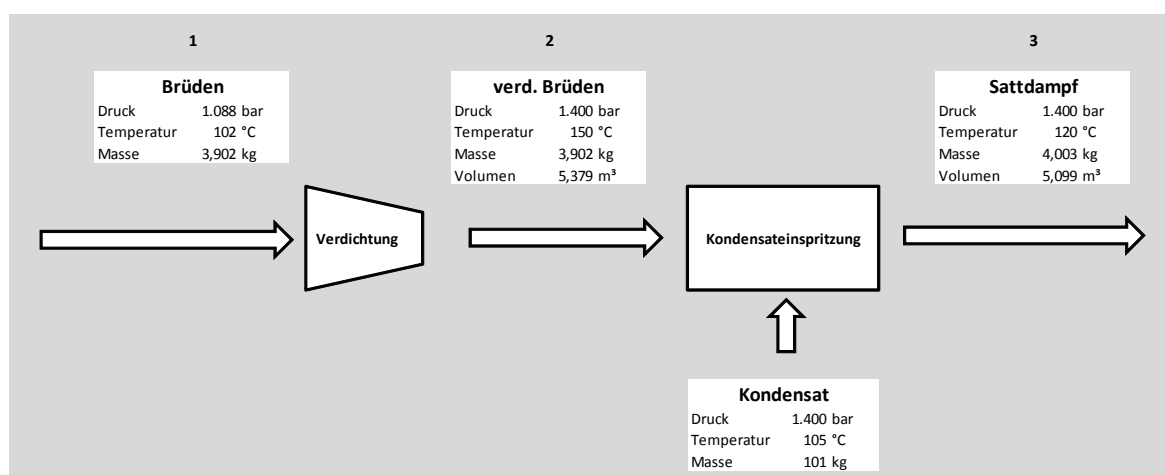


Abbildung 6: Verdichtungsprozess bei der Würzekochung

Gemäss Abbildung 6 wird der Brüden aus der Pfanne abgezogen und mechanisch auf etwa 1.4 bar und 150°C verdichtet. Nach der Verdichtung liegt überhitzter Wasserdampf vor. Durch die Kondensateinspritzung soll der überhitzte Brüden

bei gleichem Druck möglichst auf Sattedampfzustand gebracht werden, da überhitzter Dampf einen viel geringeren Wärmeübergangskoeffizienten ($\alpha \approx 70 \text{ W/m}^2\text{K}$) hat als kondensierender Sattedampf ($\alpha \approx 7'000 \text{ W/m}^2\text{K}$). Mit den jeweiligen Stoffeigenschaften der Zustände 2 und 3 kann die einzuspritzende Kondensatmenge abgeschätzt werden. Die spezifische Enthalpiedifferenz_{2,3} beträgt etwa 60 kJ/kg, sodass mit 3'900 kg überhitztem Brüden gut 100 kg Kondensat in den gasförmigen Zustand gebracht werden können. Somit dürften pro Jahr knapp 500 m³ Kondensat für diesen Prozessschritt verbraucht werden. Nachdem der Brüden als Heizmedium für den Kochprozess verwendet wurde, wird das Brüdenkondensat durch einen Wärmeübertrager geleitet und heizt Wasser auf, welches in die Brauwasserreserve gespeist wird. Dadurch können pro Jahr schätzungsweise knapp 14'000 m³ Heisswasser in die Brauwasserreserve eingespeist werden.

Ob die verbleibende Menge Kesselspeisewasser (11'500 m³) ausschliesslich für die Eindampfanlage zur Herstellung von 36'000 m³ alkoholfreiem Bier (abgeschätzt mit 20 % der Gesamtproduktion) verwendet wird ist fraglich. Offensichtlich sind hier noch weitere unbekannte Verbraucher oder Leckagen (z.B. Nachverdampfung Kondensat) vorhanden.

5.2 Abgastemperatur der Kessel

Die Abgasanlagen der Kessel verfügen bereits über einen Economiser zur partiellen Wärmerückgewinnung aus den Abgasen. Dabei erfolgt in erster Priorität die Aufheizung des Kesselspeisewassers nach der thermischen Entgasung von ca. 115°C auf 120°C. In der zweiten Priorität kann eine Anhebung des Heisswasserrücklaufes erfolgen. Bei der bisherigen Betriebsweise liegt die Begrenzung der minimalen Abgastemperatur bei 120°C, bedingt durch die Eintrittstemperatur der aufzuheizenden Ströme. Um die Abgasverluste zu minimieren sollte eine Brennwertnutzung in Betracht gezogen werden. Hierzu wurde für den Erdgasbetrieb eine Berechnung mit folgenden Parametern durchgeführt:

Tabelle 11: Randbedingungen der Berechnung zur Brennwertnutzung

Erdgasverbrauch	2'406'000	[Nm ³ /a]
Abgasvolumen, trocken	8.53	[m ³ _{Abgas} /m ³ _{Erdgas}]
Dichte Rauchgas	0.887	[kg/m ³]
Rauchgasaufkommen	20'523'180	[m ³ /a]

	18'204'061	[kg/a]
spez. Wärmekapazität Rauchgas	1.05	[kJ/kgK]
Wasseraufkommen im Abgas	1.94	[m ³ _{H2O} /m ³ _{Abgas}]
Dichte Wasserdampf im Abgas	0.6390	[kg/m ³]
Taupunkt	58	[°C]
Verdampfungsenthalpie	2'260	[kJ/kg]

Die Verschaltung einer möglichen Brennwertnutzung ist Abbildung 7 zu entnehmen. Bisher werden die ca. 18 Mio. kg anfallenden Rauchgase über die Economiser geleitet und gelangen von dort mit etwa 125°C in den Kamin (gestrichelt). Die Brennwertnutzung ist übersichtshalber zweistufig abgebildet, da zum einen die Abkühlung des Rauchgases nahe Kondensationstemperatur erfolgen muss und anschliessend die Kondensation des im Rauchgas enthaltenen Wasserdampfes. Bei der Kondensation liegt die Temperatur des austretenden Speisewasservolumenstroms bei ungefähr 50°C. Dieser Strom kann anschliessend genutzt werden, um das Rauchgas in der ersten Stufe von 125°C auf 60..65°C abzukühlen. Das damit theoretisch zu erschliessende Wärmerückgewinnungspotential liegt bei knapp 2.2 GWh pro Jahr. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass der grösste Anteil der rückgewonnenen Energie aus der zweiten Stufe der Wärmerückgewinnung resultiert. Es werden also zunächst grosse Mengen Warmwasser von 35°C auf 50°C aufgeheizt (ca. 90'000 m³/a). Würde die Speisewassereintrittstemperatur lediglich 15°C betragen, reduziert sich diese Menge auf 43'000 m³. Dies übersteigt allerdings das benötigte Zusatzspeisewasser bei weitem. Daher kommen für eine Brennwertnutzung zwei Möglichkeiten in Frage.

1. Es wird lediglich ein Teilstrom des Abgases abgezogen und für eine Brennwertnutzung verwendet. Bezogen auf die benötigten 12'000 m³ Kesselspeisewasser pro Jahr, würde sich ein Abgasvolumenstrom von 2.5 Mio. kg ergeben. Dies entspricht knapp 15 % des bei der Erdgasverbrennung anfallenden Abgases und einer Einsparung von jährlich etwa 300 MWh.

2. Der gesamte Abgasstrom steht für eine Brennwertnutzung zur Verfügung. Für diesen Fall müssten allerdings weitere aufzuheizende Heisswasserströme identifiziert werden, die in der Brauerei benötigt werden.

Unabhängig von diesen beiden Varianten, muss für eine Brennwertnutzung ein neuer Schornstein installiert werden (Edelstahl mit Isolation), sowie eine Anlagentechnik zur Ableitung und Neutralisation des Kondensates. Aus diesem

Grund sollte möglichst viel des anfallenden Abgases genutzt werden, da sich dies positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.

Bei entsprechendem Heisswasserbedarf kann die Brennwertnutzung auch auf die anderen Energieträger ausgeweitet werden.

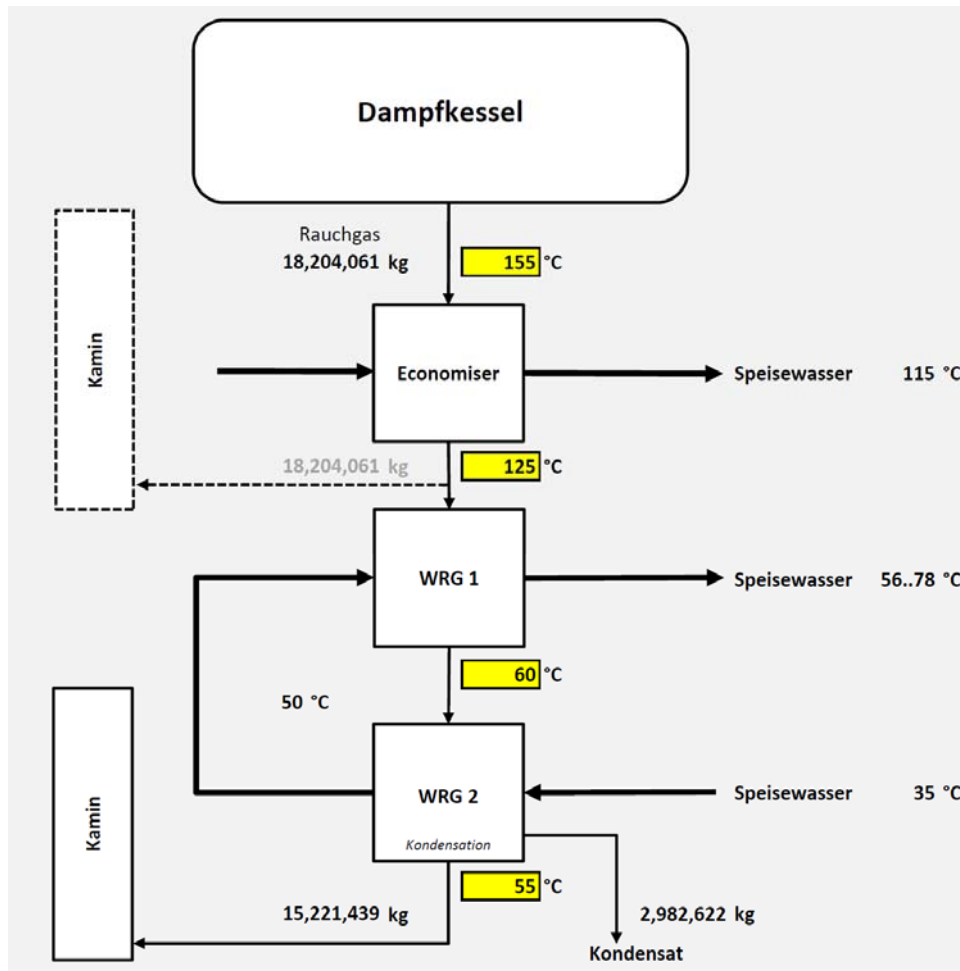


Abbildung 7: Schematischer Ablauf der Brennwertnutzung im Kesselhaus

5.3 Tunnelpasteur

Aufgrund von Verlusten bei der Pasteurisation (Schwaden, Austrag, etc.) müssen dem Tunnelpasteur pro Jahr etwa 10'000 m³ Wasser zugeführt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieser Eintrag konstant während der Produktion anfällt, was bei dem gegebenen Profil einem durchschnittlichen Volumenstrom von etwa 1.4 m³/h entspricht. Darüber hinaus erfolgt einmal pro Woche die Entleerung, Auskochung und Reinigung der Maschine. Danach muss ein Wasservolumen von 100 m³ aufgefüllt werden. Daraus resultiert ein zusätzlicher Wasserbedarf von etwa 15'000 m³ pro Jahr. Die Zieltemperatur der Pasteurisierung liegt zwischen 60 und 70°C, sodass hierbei ein zusätzlicher

Energiebedarf von etwa 1'000 MWh pro Jahr zustande kommt (Wirkungsgrad der Energiebereitstellung und -verteilung: 85 %).

5.4 Brauwasserreserve

Neben den Hauptverbrauchern Maischen und Läutern versorgt die Brauwasserreserve die CIP-Einrichtungen, den Würzekühler und weitere bisher nicht bekannte Verbraucher. Die Differenz zwischen Heisswasseranfall aus der Würzekühlung und dem Bedarf der Produktion wird durch zusätzliches Kaltwasser kompensiert. Dazu werden derzeit durchschnittlich etwa 700 m³ Wasser pro Monat zugeführt, welches zuvor über das Heisswassernetz aufgeheizt wird. Dies geschieht, wenn der Wasserspiegel in den Speichern auf ein kritisches Niveau fällt. Nach Angaben der Brauerei liegt dies an der nicht ausreichenden Speicherkapazität der Brauwasserreserve, da im Grunde ausreichend Heisswasser aus der Würzekühlung vorhanden ist. Um die Menge des zusätzlich eingespeisten Wassers zu minimieren, plant die Brauerei die Brauwasserreserve um vier Tanks à 45 m³ zu erweitern.

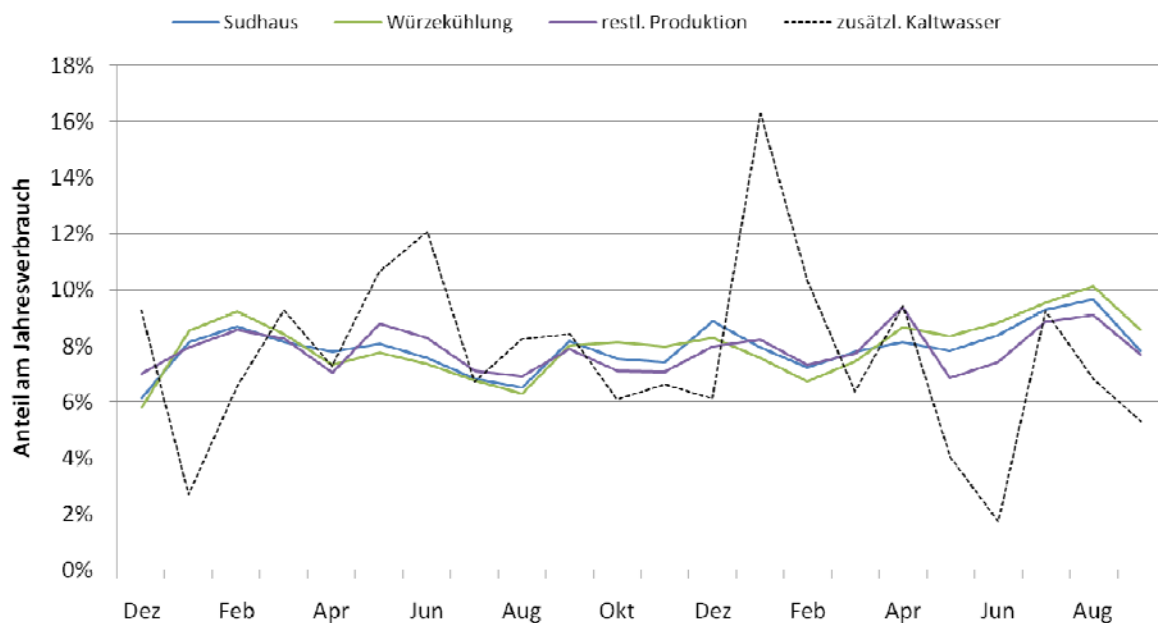


Abbildung 8: Anteil des monatlichen Wasserverbrauchs am spezifischen Jahresverbrauch

Abbildung 8 zeigt den Verbrauch der einzelnen Bereiche, die von der Brauwasserreserve mit Heisswasser versorgt werden sowie die Menge an Zusatzwasser, welche der Brauwasserreserve zugeführt werden muss. Die Anteile in Prozent beziehen sich jeweils auf den gesamten Verbrauch der einzelnen Bereiche innerhalb eines Jahres. Bei den untersuchten Daten wurde zunächst kein direkter Zusammenhang zwischen dem Wasserverbrauch und der

zusätzlich eingespeisten Kaltwassermenge deutlich. Um diesbezügliche Aussagen treffen zu können, müsste eine detailliertere Analyse des Brauwasserkreislaufs erfolgen.

5.5 Bewertung der Ergebnisse

Die zuletzt aufgeführten Punkte lassen vermuten, dass im Bereich der Heisswasserbereitstellung und des Heisswasserverbrauchs ein signifikantes Optimierungspotential besteht. Nach derzeitigem Sachstand sollten alle Heisswasserströme der Brauerei untersucht werden, um zu einer hinreichend genauen Bewertung dieses Potentials zu gelangen. Neben allen Verbrauchern die von der Brauwasserreserve versorgt werden, sind vor allem solche von Relevanz, welche Kaltwasser beziehen und dezentral aufheizen. Diese müssen identifiziert und quantifiziert werden. In einem optimierten Wasserkreislauf könnte so zum Beispiel der Wasserbedarf des Tunnelpasteurs sowie der Bedarf zur Filtersterilisation mittels Brennwerttechnik gedeckt werden.