

Entwicklung einer Verfahrenskombination aus Zeolithwärmepumpe, Vakuumeindampfsystem und Blockheizkraftwerk zur energieeffizienten Wärmeversorgung von Brauereien

gefördert von der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Abschlussbericht des Projekts

Energiesparende Brauereitechnologie

13. März 2013

Projektpartner

Brauereimaschinenfabrik KASPAR SCHULZ KG

Dipl.-Braumeister Jörg Binkert

Dipl.-Ing. Johannes Lauer

Technische Universität München

Arbeitsgruppe Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie

Dipl.-Ing. Alin Diaconu

PD Dr.-Ing. Winfried Ruß

RTWH Aachen University

Lehrstuhl für Technische Thermodynamik

Dipl.-Ing. Heike Schreiber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. André Bardow

• **Projektkennblatt**
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	23803	Referat	24	Fördersumme	387.900,00 €
Antragstitel		Energiesparende Brauereitechnologie			
Stichworte		Brauerei, Sorptionswärmespeicher, Blockheizkraftwerk.			
	Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
	48 Monate	01.08.2008	30.06.2012		
	Zwischenberichte	16.06.2009 14.02.2011	15.12.2009 15.04.2011	09.06.2010 07.02.2012	
Bewilligungsempfänger	Kaspar Schulz Brauereimaschinenfabrik & Apparatebauanstalt KG Kaspar- Schulz- Straße 1 96052 Bamberg			Tel	
				Fax	
				Projektleitung	
				Bearbeiter	
Kooperationspartner	<ul style="list-style-type: none"> • RWTH Aachen, Lst. Für Technische Thermodynamik Schinkelstraße 8 52062 Aachen • TU München, Lst. Für Rohstoff und Energietechnologie Weihenstephaner Steig 22 85350 Freising/ Weihenstephan 				
Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens					
<p>Die Herstellung von Bierwürze ist der energieintensivste Schritt in der Brauerei. In der klassischen Brauerei wird der größte Anteil zur atmosphärischen Eindampfung der Würze auf eine bestimmte Endkonzentration benötigt. Beim SchoKo-Verfahren der Kaspar Schulz e.K. erfolgt diese Eindampfung im Vakuum, wodurch die Zufuhr von Verdampfungswärme entfällt. Energieintensivster Schritt ist damit die Würzeaufheizung um ca. 25 K auf 99 °C. Die Prozesswärmeversorgung der Brauerei könnte mit Ausnahme der Würzeaufheizung mit einem Blockheizkraftwerk (BHKW) auf einem Temperaturniveau von 90 °C erfolgen. Damit wird der Einsatz von BHKWs in Brauereien sinnvoll. Der Bereich des Aufheizens über 90°C kann kurzfristig über die Aktivierung eines Zeolithspeichers erfolgen. Ziele des Projektes sind die Entwicklung und Implementierung eines Zeolith-Speichers in ein Modellsystem zur Validierung der Verfahrenskombination, Modellierung des Energiehaushaltes einer Brauerei mit dieser Verfahrenskombination zur Bestimmung der Energieströme mit ihren Randparametern und dem Gesamt-Energie und Gesamt-CO2-Einsparpotential. Bezogen auf den Einsatz von Primärenergieträgern ist eine Reduzierung des Energiebedarfs um mindestens 10 % zu erwarten.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>Die Kombination der Einzelkomponenten Zeolithspeicher und BHKW, die somit einen Dampfkessel überflüssig macht und erstmalig konventionelle BHKW-Technik zur Gesamtwärmeversorgung eingesetzt werden kann ist die eigentliche Innovation des Projektes. Ein weiterer Schritt wird nach dem Projekt die Einbindung von Biogas darstellen, das aus Brauereireststoffen wie Abwasser, Treber oder Altetiketten erzeugt werden kann und somit die Emissionen der Brauerei verringert.</p> <p>Der Arbeitsablauf unterteilt sich in folgende Abschnitte:</p>					
<ol style="list-style-type: none"> 1. Anlagenauslegung und – optimierung der Einzelkomponenten wie SchoKo, Zeolith Wärmespeicher, BHKW, Rauchgaswärmeübertrager und Warmwasserspeicher 2. Modellierung des Wärmehaushaltes einer Brauerei 3. Kinetische Untersuchungen zu möglichen Adsorbentien 4. Entwicklung und Bau der Prototypen Zeolithspeicher, Ausdampfereinheit für Wasser und Rauchgaswärmeübertrager 5. Betrieb der Prototypen im Verbund mit Messung des Verhaltens bei typischen Lastzuständen 6. Energetische Bilanzierung und betriebswirtschaftliche Betrachtung 					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt □ An der Bornau 2 □ 49090 Osnabrück □ Tel 0541/9633-0 □ Fax 0541/9633-190 □ http://www.dbu.de					

Ergebnisse und Diskussion

Bei der Herstellung von Bierwürzen wird der Brauprozess im Sudhaus durch einen Kochprozess abgeschlossen werden. Diese energieintensive Kochung kann durch eine Vakuumverdampfung ersetzt werden. Dabei wird die Würze nur auf 99 °C erwärmt, d.h. hohe Heizmedientemperaturen und Wärmeströme können entfallen. Dies ermöglicht mit Hilfe eines Adsorptionswärmespeichers ($T > 110$ °C) den Einsatz von BHKW, die durch die gleichzeitige Bereitstellung von Wärme und Strom sehr energieeffizient sind. Als Stoffpaarung für den Wärmespeicher bieten sich Zeolith und Wasser an. Die Temperaturen bei der Adsorption sind dabei so hoch, dass die freiwerdende Wärme zur Würzeerwärmung genutzt werden kann. Anschließend kann eine Regeneration durch thermisches Austreiben des Wassers erfolgen. Ziel dieses Projektes war es zu untersuchen, ob die Verfahrenskombination SchoKo-Verfahren, Zeolith-wärmespeicher und BHKW realisierbar ist und unter welchen Randbedingungen sich das Verfahren einsetzen lässt. Der Zeolithspeicher wurde in Form von vier Einzelmodulen mit je 10 kg Zeolith realisiert. Jeder Zeolithspeicher besteht aus einem Absorber und einem Verdampfer/Kondensator, die in einem Vakuumbehälter angeordnet sind. Die Speicher können bei 180 bis über 200 °C Vorlaufemperatur in 3 – 5 h regeneriert werden. Die Wärmefreisetzung kann dann innerhalb von 60 Minuten bei Temperaturen von mehr als 110 °C erfolgen. Die erzielbaren Wirkungsgrade hängen von den Kondensationstemperaturen während der Regeneration der Speicher und Verdampfungstemperaturen während der Speichernutzung ab. Der Hochtemperaturwirkungsgrad (Freisetzung von Wärme zur Würzeerwärmung) schwankt zwischen 0,5 und 0,78. Die Wirkungsgrade wurden experimentell ermittelt. Weiteres Steigerungspotenzial konnte aufgezeigt werden. Für die gesamte Verfahrenskombination wurde ein Versuchstand errichtet. Dieser besteht aus einem speziell konstruierten Abgaswärmetauscher für das eingesetzte BHKW mit Dieselmotor, 4 miteinander verschalteten Zeolithmodulen und sowie einer „Braueinheit“ (Würzepfanne, Warmwasserspeicher und zuschaltbaren SchoKo). Als Wärmeträger wird ein Hochtemperaturträgeröl eingesetzt. Da die Abgastemperaturen des eingesetzten BHKWs vorher nicht für den Betrieb der Verfahrenskombination ausreichten, wurde der Versuchstand um einen Heißluftgenerator ergänzt. Es konnte erfolgreich gezeigt werden, dass sich der geplante Verbund miteinander kombinieren und betreiben lässt. Die brautechnischen Vorgaben werden dabei eingehalten.

Die gewonnenen Daten wurden auf ein Sudhaus mit einer Ausschlagmenge von 100 hl hochskaliert und dann die entsprechende Gesamtbrauerei in ihrem Energiebedarf und zeitlichem Lastgang simuliert. In diesem Modell wurde zusätzlich noch ein Spitzenlastkessel mitberücksichtigt. Gleichzeitig wurde diese Modellierung für eine konventionelle Brauerei durchgeführt. Es zeigt sich, dass sich der Gesamtenergiebedarf der Modellbrauerei durch die vorgeschlagene Verfahrenskombination auf ca. 68 % der konventionellen Brauerei absenken lässt, auch wenn die Laufzeit des BHKWs nur 2704 h beträgt. Wirtschaftlich lässt sich die Verfahrenskombination heute nur rechtfertigen, wenn Biogas als Brennstoff genutzt wird und beim Verkauf des Stroms eine entsprechende Einspeisevergütung erzielt wird.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Das Projekt wurde durch 10 Veröffentlichungen (5 davon im internationalen Umfeld) der Fachwelt vorgestellt. Das große Interesse des Fachpublikums und die Bedeutung zeigt sich auch in den Vorträgen, welche auf Einladung über das Projekt gehalten wurden. Besonders erwähnenswert sind dabei der Vortrag vor dem Umweltausschuss des deutschen Brauerbundes und die Präsentation auf dem 33rd European Brewery Convention Congress in Glasgow.

Fazit

Die im Projektantrag gesteckten Ziele wurden, wenn auch teilweise verzögert, erreicht. In Folge der im Rahmen des Projekts gesammelten Erfahrungen und Erkenntnissen ist die Brauereimaschinenfabrik Kaspar Schulz in der Lage, das Gefäß eines Zeolithspeichers auszulegen und zu fertigen. Zum Einsatz kommen kann der Speicher in Kombination mit einem Blockheizkraftwerk in Brauereien mit unterschiedlicher Betriebsgröße, oder weiteren industriellen Prozessen mit ähnlicher Wärmebedarfstruktur. Die derzeitigen wirtschaftlichen und politischen Gegebenheiten lassen nur einen Einsatz mit den engen Randbedingungen Biogas und EEG-Nutzung zu. Rein unter den Gesichtspunkten der CO₂-Einsparung und Energieeffizienz ist das Verfahren als sehr positiv zu werten. Die Kaspar Schulz Brauereimaschinenfabrik und Apparatebauanstalt e.K. kann demnach mit der Kombination von SchoKo, BHKW und Zeolithwärmespeicher ein weiteres umweltfreundliches Verfahren für die Brauindustrie anbieten.

Inhaltverzeichnis

1	Zusammenfassung	6
2	Einleitung	7
3	Hauptteil	11
3.1	Entwicklung und Charakterisierung des Zeolithwärmespeichers	11
3.1.1	Auslegung des Zeolithwärmespeichers für die Versuchsanlage	11
3.1.2	Vermessung des Zeolithwärmespeichers.....	15
3.2	Konzeption und Betrieb der Verbundanlage.....	27
3.2.1	Entwicklung und Bau des Rauchgaswärmeübertragers	27
3.2.2	Entwicklung und Bau der Heißluftgebläse	29
3.2.3	Anlagenauslegung und –optimierung	30
3.2.4	Betrieb der Prototypen im Verbund	33
3.2.5	Ergebnisse der Messungen	37
3.3	Grundlegende Auslegungsdaten der Modellbrauerei mit Verfahrenskombination BHKW, Zeolithspeicher und SchoKo	40
3.4	Modellierung und energetische Bilanzierung der Modellbrauerei im Vergleich mit konventioneller Brauerei	44
3.4.1	Ergebnisse der Modellierung	45
3.4.2	Energie und CO ₂ -Einsparungspotential	50
3.5	Betriebswirtschaftliche Betrachtung.....	52
4	Bewertung des untersuchten Verfahrens und Zukunftsperspektiven	54
5	Literaturverzeichnis	56
6	Anhang	57
6.1	Darstellung der Modellierung in Excel	57
6.2	Veröffentlichungen.....	61

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1 <i>Ergebnisse der Adsorptionskinetikmessung an verschiedenen Zeolithtypen</i>	12
Abbildung 2 <i>Adsorber (links), Verdampfer (mitte) und Zeolithspeichermodule (rechts)</i>	15
Abbildung 3 <i>Speicherprüfstand an der RWTH Aachen</i>	16
Abbildung 4 <i>Schema des Prüfstands</i>	16
Abbildung 5 <i>Desorptionsphase am Speicherprüfstand</i>	17
Abbildung 6 <i>Adsorptionsphase am Speicherprüfstand</i>	17
Abbildung 7 <i>Desorptionsphase bei reduzierter Anlagengröße am Speicherprüfstand</i>	19
Abbildung 8 <i>Adsorptionsphase bei reduzierter Anlagengröße am Speicherprüfstand</i>	19
Abbildung 9 <i>Hochtemperaturkreislauf bei zyklischer Messung am Speicherprüfstand</i>	21
Abbildung 10 <i>Theoretischer Wärmespeicher-Gesamtwirkungsgrad in Abhängigkeit von der Isolation</i>	24
Abbildung 11 <i>Schnittzeichnungen des Abgaswärmetauschers</i>	28
Abbildung 12 <i>Schema der Heißluftgebläseanlage</i>	29
Abbildung 13 <i>SchoKo Versuchsanlage</i>	30
Abbildung 14 <i>Fließbild SchoKo</i>	31
Abbildung 15 <i>Ruß aus dem Wärmetauscher</i>	32
Abbildung 16 <i>Schnittzeichnung Würzepfanne und Isolierte Würzepfanne mit Rührwerk</i>	32
Abbildung 17 <i>Frontansicht auf den Versuchsstand</i>	33
Abbildung 18 <i>Schematischer Versuchsaufbau mit eingesetzter Messtechnik</i>	36
Abbildung 19 <i>Desorptionsvorgang in der Verbundanlage</i>	37
Abbildung 20 <i>Würzepfanne Aufheizvorgang in der Verbundanlage</i>	38
Abbildung 21 <i>Wärmetauscher Effizienz bei veränderlichem Luftmassenstrom</i>	39
Abbildung 22 <i>Aufladung und Entladung des Wärmespeichers</i>	39
Abbildung 23 <i>Graphische Darstellung der Energiezunahme in der Würzepfanne</i>	40
Abbildung 24 <i>Belegungsdiagramm des Sudhauses</i>	41

Abbildung 25 <i>Fließschema der Gesamtanlage</i>	42
Abbildung 26 <i>Hochtemperaturwärmebedarf der Modellbrauerei (Temperaturniveau > 90 °C)</i>	46
Abbildung 27 <i>Hochtemperaturwärmeangebot der Modellbrauerei (Temperaturniveau > 90 °C)</i>	47
Abbildung 28 <i>Niedertemperaturwärmebedarf der Modellbrauerei (Temperaturniveau < 90 °C)</i>	48
Abbildung 29 <i>Niedertemperaturwärmeangebot und Speicherstände der Modellbrauerei (Temperaturniveau < 90 °C)</i>	49

Tabellen Verzeichnis

Tabelle 1 <i>Wirkungsgrade bei Temperaturvariation des Niedertemperaturkreislaufs</i>	25
Tabelle 2 <i>Charakteristiken vom Warmwasserspeicher</i>	33
Tabelle 2 <i>Dimensionen der Komponenten, Sudhaus mit 100 hl</i>	43

1 Zusammenfassung

Bei der Herstellung von Bierwürzen wird der Brauprozess im Sudhaus durch einen Kochprozess abgeschlossen. Diese energieintensive Kochung kann durch eine Vakuumverdampfung (SchoKo-Verfahren der Kaspar Schulz Brauereimaschinenfabrik und Apparatebauanstalt e.K.) ersetzt werden. Dabei wird die Würze nur auf 99 °C erwärmt, d.h. hohe Heizmedientemperaturen und Wärmeströme können entfallen. Dies ermöglicht unter bestimmten Voraussetzungen den effizienten Einsatz von BHKWs zur Wärmeversorgung. Dabei wird die Grundlast der Brauerei bei 80°C durch die Niedertemperaturabwärme des BHKW gedeckt und das Aufheizen der Würze erfolgt mit der höheren Temperatur des BHKW-Abgases.

Blockheizkraftwerke sind durch die gleichzeitige Bereitstellung von Wärme und Strom sehr energieeffizient. Ihre Wirtschaftlichkeit hängt aber sehr stark von der Nutzungsdauer und den für den Strom erzielbaren Erlösen ab. Zur Erhöhung der Nutzungsdauer des BHKW wird daher ein Wärmespeicher benötigt, um die Abgaswärme optimal für den energieintensiven aber kurzen Aufkochprozess zu nutzen. Zur Speicherung von Wärme oberhalb von 110 °C sind insbesondere Adsorptionswärmespeicher geeignet. Hierzu wird der physikalische Effekt der Adsorption von Wasser an Zeolith genutzt. Die dabei erzielbaren Temperaturen sind so hoch, dass die freiwerdende Wärme zur Würzeerwärmung genutzt werden kann. Anschließend erfolgt eine Regeneration durch thermisches Austreiben des Wassers. Dabei wird Wärme auf einem niedrigeren Temperaturniveau frei, die ebenfalls in der Brauerei genutzt werden kann.

Ziel dieses Projektes war es zu untersuchen, ob die Verfahrenskombination SchoKo-Verfahren, Zeolithwärmespeicher und BHKW realisierbar ist und unter welchen Randbedingungen sich das Verfahren einsetzen lässt. Der entwickelte Zeolithspeicher wurde in Form von vier Einzelmodulen realisiert und erfüllt die Voraussetzungen für die Verfahrenskombination. Jeder Zeolithspeicher besteht aus einem Absorber und einem Verdampfer/Kondensator, die in einem Vakuumbehälter angeordnet sind. Für die gesamte Verfahrenskombination wurde ein Versuchstand errichtet. Dieser besteht aus einem speziell konstruierten Abgaswärmetauscher für das eingesetzte BHKW mit Dieselmotor, vier miteinander verschalteten Zeolithmodulen und sowie einer „Braueinheit“ (Würzepfanne, Warmwasserspeicher und zuschaltbarer SchoKo). Es konnte erfolgreich gezeigt werden, dass sich der geplante Verbund miteinander kombinieren und betreiben lässt. Die gewonnenen Daten wurden auf ein Sudhaus mit einer Ausschlagmenge von 100 hl hochskaliert und dann die entsprechende Gesamtbrauerei in ihrem Energiebedarf und zeitlichem Lastgang simuliert. Es zeigt sich, dass sich der Gesamtenergiebedarf der Modellbrauerei durch die vorgeschlagene Verfahrenskombination auf ca. 68 % der konventionellen Brauerei absenken lässt, auch wenn die Laufzeit des BHKWs nur 2704 h beträgt. Wirtschaftlich lässt sich die Verfahrenskombination rechtfertigen, wenn Biogas als Brennstoff genutzt wird und beim Verkauf des Stroms eine entsprechende Einspeisevergütung erzielt wird.

2 Einleitung

Während des Brauprozesses werden die Rohstoffe Wasser und Malz unter Zugabe von Hopfen und Hefe zu Bier verarbeitet. Das Malz wird dabei mit dem vorgewärmten Brauwasser vermischt, um die im Korn enthaltenen Inhaltsstoffe zu lösen. Nach dem Abfiltrieren wird die so genannte Würze um etwa 6 % eingedampft, um die gewünschte Konzentration von vergärbaren Inhaltsstoffen (Stammwürze) zu erhalten, die Malzenzyme weitgehend zu inaktivieren und unerwünschte Inhalts- und Geschmacksstoffe auszutreiben. Nach der Hopfenzugabe werden noch enthaltene grobe Trubstoffe im Whirlpool abgetrennt, die Würze mit Brauwasser im Gegenfluss auf etwa 13 °C abgekühlt und mit Glykol auf die Anstelltemperatur von 4 – 8 °C gebracht. Nach der Hefezugabe wird das Jungbier gelagert, ehe es abgefüllt wird.

Die energieaufwendige Würzeindampfung findet bei Atmosphärendruck in speziellen Innen- oder Außenkochern statt. Es werden durchschnittlich 6 Massen-% der Würze in 1 h ausgedampft. Die Wärmeversorgung von Brauereien erfolgt typischerweise mit Dreizug- Dampfkesseln bei Dampftemperaturen zwischen 110 und 130 °C. Die vor- bzw. nachgeschalteten Prozesse der Bierbereitung benötigen Temperaturen von maximal 95 °C, was das Vorhalten von Dampf nicht rechtfertigt.

Durch den Einsatz eines Vakuumverdampfers (SchoKo) hat die Kaspar Schulz Brauereimaschinenfabrik und Apparatebauanstalt e.K das Brauverfahren vollständig verändert. Die Würze wird hierbei zunächst auf 99 °C erwärmt. Die immer noch technologisch notwendige Eindampfung erfolgt nach einer Heißhaltephase im Vakuum. Die notwendige Verdampfungsenthalpie wird hierbei jedoch nicht von außen zugeführt, sondern generiert sich aus der Abkühlung der Würze von 97 °C auf 80 °C. Energieintensivster Schritt ist damit die Würzeaufheizung um ca. 25 K. Der Energieaufwand für die Prozessschritte Aufheizen und Eindampfen halbiert sich dabei [1]. Die Wärmeleistung und die notwendigen Wärmeübertragerflächen wurden über die Eindampfleistung parametrisiert. Die darüber gegebenen hohen Aufheizraten sind technologisch nicht notwendig [2], was eine Reduzierung der Leistung für die Aufheizung erlaubt.

Kein Wärmeverbraucher, außer dem Sudhaus, benötigt prozesstechnisch Wärmeträgertemperaturen über 90 °C. Der Betrieb eines Dampfkessels ist somit technologisch und technisch nicht mehr zwingend und sinnvoll, wenn eine Möglichkeit zur Würzeerwärmung auf 99 °C gegeben ist.

Die Kraft-Wärme-Kopplung (BHKW) ist eine bewährte Technologie zur besseren Ausnutzung des eingesetzten Brennstoffes. Mit dieser Technik werden in der Regel energetische Gesamtwirkungsgrade von 85 % und höher erreicht. Somit kann gegenüber der getrennten Erzeugung von Wärme und elektrischem Strom Primärenergie eingespart werden, wodurch sowohl die Betriebskosten als auch die CO₂-Emissionen gesenkt werden können. Jedoch ist der Einsatz von KWK-Anlagen mit höheren Investitionssummen und somit mit höheren Kapitalkosten verbunden. Um dennoch einen wirtschaftlichen Betrieb solcher Anlagen zu erreichen, ist es wichtig, möglichst hohe Laufzeiten zu erzielen. Dies führt dazu, dass BHKW-Aggregate oft nur zur Grundlastabdeckung eingesetzt werden. Die Spitzenlastabdeckung erfolgt dann über Strombezug aus dem Netz und Betrieb eines Spitzenlastkessels.

Die beim Aufheizen der Würze auf 99 °C benötigte Wärme von 110°C könnte theoretisch mit einem BHKW bereit gestellt werden. Die Siedezeit beträgt jedoch lediglich etwa 10 % der Würzebereitungszeit. Die sich ergebenden Laufzeiten des BHKW wären somit so gering, dass ein wirtschaftlicher Einsatz nicht möglich ist. Des Weiteren müsste die thermische Leistung der BHKW-Anlage sehr hoch ausfallen, um diesen energieintensiven Prozessschritt zu betreiben. Zudem würde die Aufwärmphase nur einen Bruchteil der gesamten Wärmebereitstellung betragen, was die Kosten für ein heißgeköhltes BHKW nicht rechtfertigt.

Hier können Wärmespeicher auf Zeolithbasis nützlich sein. Zeolithe sind poröse Alumosilikate, die ohne Änderung ihrer Struktur bis zu 30 Massen-% Wasser binden (adsorbieren) können, wodurch Wärme freigesetzt wird. Das so adsorbierte Wasser kann durch Erwärmung des Zeolithen wieder ausgetrieben (desorbiert) werden. Auf diese Weise wird Wärme in diesen Adsorbentien gespeichert, wobei die Desorption der Phase des Einspeicherns und die Adsorption der Speichernutzung entspricht. Die Änderung der Menge adsorbierten Wassers ist hierbei bestimmend für die speicherbare Wärmemenge. Diese ist abhängig sowohl von der Temperaturspreizung als auch von den Prozessdrücken während der Adsorption und der Desorption. Die Drücke entsprechen den Wasserdampfdrücken, die sich einstellen je nach Verdampfungs- bzw. Kondensationstemperatur des Wassers während Ad- bzw. Desorption. Eine Besonderheit dieser Speichertypen sind daher zwei Wärmeübertrager, einer für Hochtemperatur- im Adsorber und einer für Niedertemperaturwärmeströme im Verdampfer. Während die speicherbare Wärme über den Hochtemperaturwärmeübertrager den Adsorber aufheizt, muss im Verdampfer die Kondensationswärme des Wassers abgeführt werden und umgekehrt muss Verdampfungswärme auf Niedertemperaturniveau zugeführt werden, wenn die gespeicherte Wärme im Hochtemperaturwärmeübertrager entnommen wird. Je nach Anwendungsfall kann zusätzlich zur Adsorptionswärme die Kondensationswärme genutzt werden, bzw. mittels der Verdampfung kann Kälte erzeugt werden.

Ein Adsorptionswärmespeicher mit dem Stoffpaar Zeolith Wasser kann das hohe Temperaturniveau des Abgaswärmeübertragers eines BHKWs nutzen und unter den Bedingungen des Brauprozesses sowohl hohe Wärmespeicherdichten erzielen, als auch die erforderliche erhöhte Wärmeleistung für die Würzeerwärmung bereitstellen. Eine Kombination von Zeolithspeicher mit BHKW würde daher den Einsatz eines Blockheizkraftwerkes in einer Brauerei mit relativ niedriger Leistung aber hohen Laufzeiten ermöglichen.

Durch ein BHKW kann neben der benötigten thermischen Energie auch elektrische Energie erzeugt werden und somit die Brauerei unabhängiger vom Energieversorger werden. Darüber hinaus ist ein Gesamtenergienutzungsgrad bezogen auf den Brennstoffeinsatz von ca. 0,9 erreichbar, während der Wirkungsgrad eines herkömmlichen Dampfkessels bei etwa 0,85 liegt, was zu einer weiteren Energieeinsparung führt. Das neue Verfahren der Prozesswärmebereitstellung ermöglicht also eine deutliche Reduktion der CO₂-Emissionen. Zusätzlich erlaubt das BHKW den Einsatz von Biokraftstoffen. Bei einem Einsatz von Biogas können außerdem Brauereireststoffe wie Abwasser, Etiketten, Treber, etc. zur Energiegewinnung genutzt werden. Somit wird die Emission der Brauerei gesenkt und eine weitere Unabhängigkeit vom Energiemarkt realisiert. Daraus würde sich eine Steuerung und Optimierung

der Energie- und Stoffströme innerhalb der Brauerei ergeben, die das Brauverfahren umweltverträglicher machen [3].

Ziel des Projektes war es, den Prozessschritt der Würzebereitung, der den größten Energieverbrauch bei der Bierherstellung darstellt, energiesparender zu gestalten. Durch die Kombination von SchoKo und Zeolithwärmespeicher werden die maximalen Prozesstemperaturen auf unter 100 °C gesenkt und die Energiewärmeströme durch ein Speichersystem optimal an den Prozess angepasst. Die Grundwärmeversorgung erfolgt über ein BHKW bei 90 °C, wodurch etwa 90 % des Gesamtbedarfs abgedeckt werden. Die nur kurz benötigte Heizwärme von max. 110 °C wird über ein Speichersystem realisiert, so dass der Betrieb des BHKW bei konstanter Grundlast erfolgen kann. Damit ist für eine solche Brauerei kein Dampfkessel mehr notwendig, der konstant bei maximaler Heizwärmetemperatur gefahren werden muss. Das BHKW für die Konstruktion einer Versuchsverbundanlage wurde von der TU München gestellt. Die Wärme aus den Reserven an warmen Brau- und Betriebswasser (bis 90 °C), - generiert aus der BHKW-Abwärme zu Nicht-Produktionszeiten- wird zum Verdampfen des Arbeitsmittels im Zeolithspeicher verwendet. Durch das Festlegen des Arbeitsmittels und der Verdampfungstemperatur ergibt sich der Verdampferdruck (Sättigungsdruck) im Modul. Für das hier vorgestellte Forschungsprojekt kommt die Stoffpaarung Zeolith-Wasser zum Einsatz. Die Hochtemperaturwärme des Motors (Abgasseite) wird zur Desorption des Zeolithen verwendet. Die bei der Adsorption frei werdende Wärme wird zum Betrieb der Würzefanne eingesetzt. Bedingt durch den geplanten Einsatz eines BHKW ist zudem ein Warmwasserspeicher für die Niedertemperaturabwärme aus dem Kühlwasser notwendig. Dieser kann gleichzeitig als Wärmesenke bei der Kondensation genutzt werden; alternativ auch als Wärmequelle für die Verdampfung. Hierbei wird die Kühlwasserwärme des BHKW's in den Wärmespeicher eingebracht. Die optimale Auslegung und Integration der Anlagen waren Inhalt dieses Forschungsprojektes.

Ziel der Untersuchungen war auch, neben der grundlegenden Funktionalität die optimalen Einzelkomponenten zu eruiieren und das Zusammenwirken zu untersuchen. Weiterführende Untersuchungen ergaben Auskunft über die Regenerationsfähigkeit und Dauerbelastung der Zeolithe. Zusätzlich zu den experimentell gewonnenen Daten wurden sämtliche Energieströme berechnet und modelliert, um so die Prozesse im Sudhaus aufeinander abstimmen und das BHKW optimal nutzen zu können. Der Wärmehaushalt einer Brauerei wird durch den vorgeschlagenen Prozess grundlegend verändert. Die Systemintegration von Zeolithwärmespeicher, größeren Warmwasserspeichern und der Wärme eines BHKW erfordert eine völlige Neustrukturierung der Produktionsabläufe und der eingesetzten Wärmeübertragungssysteme, was ebenfalls Gegenstand der Forschung war. Basierend auf der Bestimmung aller Energieströme und Randparameter zu den unterschiedlichen Zeitpunkten der Würzebereitung wurde eine Modellierung des Wärme- und Energiehaushalts einer Brauerei mit der beschriebenen Verfahrenskombination erstellt. Die Anfertigung eines zusätzlichen Modells einer konventionellen Brauerei diente dazu, Aussagen über das Gesamtpotential an Energieeinsparung zu treffen.

Die Abgastemperatur eines Vorkammer-Dieselmotors beträgt in Abhängigkeit vom Teillast-Wirkungsgrad 330 – 350 °C. In typischen BHKWs wird das Abgas auf ca. 120 °C abgekühlt.

50 % der gesamten Motorabwärme sind in den Rauchgasen enthalten. Der Rest wird über die Wasser- und Ölkühlung bei ca. 90 °C frei. Welche Abgastemperatur sich durch die Verschaltung BHKW mit Zeolithspeicher ergibt, war eine im Projekt zu lösende Auslegungs- und Experimentalfrage. Für die Annahmen die diesem Projekt zu Grunde lagen, wurde sehr vorsichtig mit einer Abgastemperatur nach der Desorptionsschaltung von 240 °C gerechnet. Die über die Zeit gemittelte Austrittstemperatur des Abgaswärmeübertragers sollte die 240 °C jedoch deutlich unterschreiten. Unter dieser Annahme steht ein Viertel des BHKW Wärmestroms mindestens zur Desorption zur Verfügung.

Die Berechnungen beziehen sich auf ein 100 hl Sudhaus. Bei 2 Suden pro Tag ergibt sich ein Gesamtbierausstoß von 41 600 hl/a ($100 \text{ hl} \cdot 2 \text{ Sude} \cdot 4 \text{ Tage/Woche} \cdot 52 \text{ Wochen}$). Derzeit niedrigster Benchmarkwert für den Wärmebedarf einer Brauerei ist 23,6 kWh/hl. Diesen Wert erreichen aber nur optimierte Großbrauereien. Kleinere Brauereien, die auch die geplante Nutzergruppe darstellen, haben einen Wärmebedarf von bis zu 33,0 kWh/hl. Die Leistungsspitze im Wärmebedarf stellt derzeit das Kochen der Würze mit max. 500 kW bei einem 100 hl-Sudhaus dar. Durch den Einsatz des SchoKo-Systems reduziert sich die maximale Leistung auf unter 300 kW. Über die Verfahrenskombination Zeolith- Speicher / BHKW soll die Würzeaufheizung/-behandlung mit Wärme versorgt werden. Die veranschlagte Wärmemenge liegt bei 3,5 kWh/hl (Erwärmung der Würze um 25 K auf 99 °C zuzüglich Heißhaltung). Dies entspricht einem Gesamtwärmeanteil von fast 15 %. Die oben angenommene Brauerei mit einem Jahresausstoß von 41 600 hl/a benötigt eine Gesamtwärme von ca. 100 000 kWh/a (23,6 kWh/hl). Dabei handelt es sich um einen Betrieb mit einer täglichen Arbeitszeit von 12 h an 250 Tagen. Bei Optimierung des Betriebs (Teil des beantragten Arbeitsprogramms) ergibt sich eine Laufzeit von 4000 h für die Wärmeversorgung. Unter der theoretischen Annahme, dass der Wärmebedarf als völlig gleich angenommen werden kann, wird eine thermische Leistung von 250 kW vom BHKW benötigt.

Bezogen auf den Einsatz von Primärenergieträgern ist eine Reduzierung des Energiebedarfs möglich. Das CO₂-Einsparpotential ergibt sich neben der Energieeinsparung auch aus der Möglichkeit, Pflanzenöle als Brennstoff und der Chance der Biogasnutzung bei Vergasung eigener Reststoffe. Die Erfassung aller Daten ermöglichte eine betriebswirtschaftliche Betrachtung des Einsatzes der Verfahrenskombination aus Blockheizkraftwerk, Zeolithspeicher und Schonkochverfahren in einer Brauerei mit einem Bierausstoß von ca. 41 000 hl/a.

3 Hauptteil

Im Rahmen des Projekts „Energiesparende Brauereitechnologie“ wurde ein Verbund aus Motorheizkraftwerk, Zeolithwärmespeicher und Vakuumeindampfsystem für die Wärmeversorgung einer Bauerei entwickelt. Die Auslegung der Anlagen basiert auf dem Wärmebedarf eines Brauprozesses mit SchoKo, dem innovativen Vakuumeindampfsystem der Firma Kaspar-Schulz. Für die experimentelle Untersuchung der entwickelten Verfahrenskombination wurde ein an der TU München vorhandenes Blockheizkraftwerk als Wärmequelle für den Prozess genutzt. Der Zeolithspeicher wurde an der RWTH Aachen ausgelegt, vermessen und optimiert und schließlich in Weihenstephan im Verbund getestet. Ausgehend von den Erfahrungen der Versuchsanlagen in Weihenstephan und Aachen wurde eine Modellbrauerei ausgelegt und deren Wärmehaushalt modelliert. Das Modell diente schließlich der energetischen Bilanzierung der Verfahrenskombination sowie der betriebswirtschaftlichen Betrachtung.

3.1 Entwicklung und Charakterisierung des Zeolithwärmespeichers

Um die Verfahrenskombination aus Vakuumeindampfsystem, Blockheizkraftwerk und Zeolithwärmespeicher experimentell zu verifizieren und Aussagen über das Betriebsverhalten treffen zu können, wurde eine Versuchsanlage ausgelegt. Am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik der RWTH Aachen University wurde für den Einsatz in der Versuchsanlage ein Zeolithwärmespeicher entwickelt und gebaut. Die Versuchsanlage des Verbundes wurde später an der TU München aufgebaut und betrieben, siehe Abschnitt 2.2. In Aachen fanden weitere Untersuchungen des Betriebsverhaltens des Zeolithwärmespeichers statt.

3.1.1 Auslegung des Zeolithwärmespeichers für die Versuchsanlage

Der Zeolithwärmespeicher wurde anhand der Vorgaben des Brauprozesses und der Wärmeversorgung durch das BHKW ausgelegt. Während des Brauprozesses soll der Speicher bei niedriger Leistung durch das BHKW beladen werden, um dann für die Würzeaufheizung die nötige Leistung bereitzustellen und somit eine Leistungsverschiebung zu erreichen. Für diese Aufgabe wurde ein geeignetes Adsorbens ausgewählt und der Speicher dimensioniert und gebaut.

Kinetische Untersuchungen zu möglichen Adsorbentien

Die Adsorptions- und Desorptionsendtemperaturen bestimmen entscheidend die Wahl des Adsorbentmaterials, das bei diesen Temperaturen eine hohe Beladungsänderung aufweisen muss. Für den Brauprozess ergeben sich die Arbeitstemperaturen des Speichers aus der

Temperatur des BHKW-Abgases von 240°C als obere Grenze zu Ende der Desorption und der minimalen Temperatur zur Aufheizung der Würzpfanne als untere Grenze zu Ende der Adsorption. Die Adsorptionsendtemperatur ergibt sich aus der maximalen Würztemperatur von 99°C und einer erforderlichen Temperaturdifferenz zur Wärmeübertragung (11 K) zu 110°C.

Als Grundlage für die Auswahl eines passenden Adsorbentmaterials wurden am LTT verschiedene Materialien untersucht. Für die im Prozess geforderten Temperaturen kommen verschiedene Zeolithe in Frage, die Wasserdampf adsorbieren und eine hohe Beladungsänderung aufweisen. Untersucht wurden unter anderem die Zeolithtypen NaY, 13 X und 4 A, zumal diese gut verfügbar sind und über eine hohe Beladungsänderung sowie Adsorptionsenthalpie verfügen.

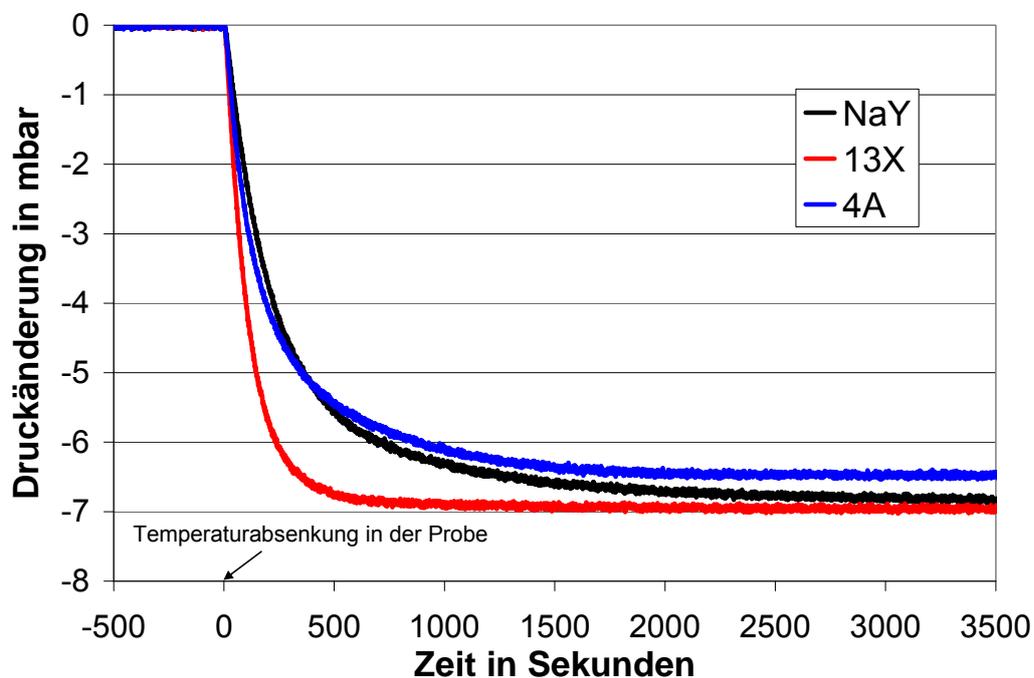


Abbildung 1 Ergebnisse der Adsorptionskinetikkmessung an verschiedenen Zeolithtypen

Die Adsorption ist aufgrund der kürzeren Prozesszeit im Projekt der kritische Vorgang, weshalb die Adsorptionskinetik des Materials eine wichtige Rolle bei dessen Auswahl spielt. Daher wurde die Kinetik der Wasserdampfadsorption vermessen, das heißt jeweils eine Probe des Adsorbens wurde einer Temperaturabsenkung von 65 °C ausgesetzt, wodurch das Material Wasserdampf aus seiner Umgebung aufnimmt. Diese Adsorption kann anhand einer Druckabsenkung im konstanten Messvolumen festgestellt werden. Die Ergebnisse der Kinetikmessungen für die oben genannten Materialien sind Abbildung 1 zu entnehmen. Der Zeolith 13 X zeigt bei der Adsorption eine sehr gute Kinetik, da die Geschwindigkeit der Druckabsenkung im Vergleich mit den anderen Materialien am höchsten ist.

Auf Grund seiner guten Kinetik, Verfügbarkeit und der Eignung für die Prozesstemperaturen wurde der Zeolith Typ 13 X im Projekt ausgewählt.

Auslegung der Speichergröße

Grundlage der Dimensionierung des Modellsystems zur Untersuchung der Verfahrenskombination aus Vakuumeindampfsystem, Blockheizkraftwerk und Zeolithwärmespeicher ist das vorhandene BHKW als Wärmequelle für den Prozess. Das BHKW der Versuchsanlage ist bereits vorhanden und hat bei insgesamt 8 kW thermischer Leistung ein festes Verhältnis von Nieder- zu Hochtemperaturwärme von 3:1. Die Hochtemperaturwärme kann dem Abgaswärmetauscher des BHKW bei Temperaturen über 130 °C entnommen werden, die Niedertemperaturwärme entstammt dem Kühlwasserkreislauf-Wärmetauscher, der Wärme bei circa 90 °C liefert. Es ergeben sich also im Auslegungszustand des BHKW folgende Leistungen:

$$\dot{Q}_{HT} = 2 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{NT} = 6 \text{ kW}$$

Weil es wirtschaftlich notwendig ist, das BHKW so klein wie möglich zu wählen, ist der Hochtemperaturwärmebedarf des Brauprozesses der entscheidende Faktor für die Auslegung. Der einzige Prozessschritt auf Hochtemperaturniveau ist das Kochen der Bierwürze.

Zunächst werden die benötigten Wärmemengen betrachtet, um die Größen der einzelnen Anlagenkomponenten festlegen zu können. Pro Hektoliter Bierwürze wird der folgende Hochtemperaturwärmebedarf ermittelt, wobei eine Aufheizung von 74 °C auf 99 °C zu Grunde gelegt wird.

$$\begin{aligned} Q_{\text{Kochen}} &= 0,1 \frac{\text{m}^3}{\text{hl}} \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot c_{p,\text{Wasser}} \cdot \Delta T \\ &= 0,1 \frac{\text{m}^3}{\text{hl}} \cdot 980 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,00418 \frac{\text{MJ}}{\text{kgK}} \cdot (372,15 - 347,15) \text{ K} = 10,24 \frac{\text{MJ}}{\text{hl}} \end{aligned}$$

Diese Wärme muss durch den Hochtemperaturwärmeübertrager des BHKW mit 2 kW Leistung in einer Betriebsdauer von 6 h pro Sud (Bierwürze) bereitgestellt werden. Daraus lässt sich das maximale Sudvolumen berechnen zu:

$$\begin{aligned} V_{\text{Sud}} &= \frac{P_{\text{th}} \cdot \Delta t \cdot \eta_{\text{RL}} \cdot \eta_{\text{Sp}}}{Q_{\text{Kochen}}} \\ &= \frac{2 \text{ kW} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \cdot 6 \text{ h} \cdot 0,7 \cdot 0,9}{10,24 \frac{\text{MJ}}{\text{hl}} \cdot \underbrace{1,1}_{\text{Warmhalten}}} \approx 2,42 \text{ hl} \end{aligned}$$

wobei ein Speicherwirkungsgrad von 70 % und ein Rohrleitungswirkungsgrad von 90 % angenommen werden, sowie 10 % zusätzlicher Wärmebedarf zum Warmhalten des Suds.

Während des Bierherstellungsprozesses wird 5 Stunden lang lediglich Niedertemperaturwärme benötigt. In dieser Zeit wird der Speicher mit der Wärme aus dem heißen Abgas des BHKW beladen. Während der letzten Stunde im Prozess muss dann die Würze in der Würzepfanne aufgeheizt werden. Hierzu stehen 2 kW vom BHKW und die Leistung des Zeo-

lithspeichers zur Verfügung. Insgesamt ist zur Aufheizung der Würze folgende Leistung notwendig:

$$P_{\text{Kochen}} = \frac{10,24 \frac{\text{MJ}}{\text{hl}} \cdot 2,42 \text{ hl}}{3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \cdot 1 \text{ h}} \approx 6,88 \text{ kW}$$

Die Leistungen teilen sich dabei wie folgt auf:

$$P_{\text{Kochen}} = P_{\text{MHKW}} + P_{\text{Zeolithspeicher}} = 2 \text{ kW} + 4,88 \text{ kW}$$

Anhand der Leistungsabschätzung für die Hochtemperaturwärme im Brauereiprozess ergibt sich für den Zeolithspeicher:

$$P_{\text{Desorption}} = 2 \text{ kW} \quad P_{\text{Adsorption}} = 4,88 \text{ kW}$$

$$t_{\text{Desorption}} = 5 \text{ h} \quad t_{\text{Adsorption}} = 1 \text{ h}$$

Für den Zeolith 13 X kann bei den im Prozess vorliegenden Temperaturniveaus als untere Grenze von einer durchschnittlichen Adsorptionsenthalpie von 2700 kJ/kg und einer Beladungsänderung von 0,16 kg/kg ausgegangen werden. Konservativ abschätzen lässt sich dann anhand der freigesetzten Adsorptionswärme folgende Zeolithmasse:

$$m_{\text{Zeolith}} = \frac{P_{\text{Adsorption}} \cdot \Delta t_{\text{Adsorption}}}{\Delta h_{\text{Ads}} \cdot \Delta x}$$

$$= \frac{4,88 \text{ kW} \cdot 3600 \text{ s}}{2700 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,16 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}} \approx 40,7 \text{ kg}$$

Aufbau des Zeolithwärmespeichers

Neben der richtigen Dimensionierung des Speichers und der schnellen Kinetik der Adsorption bedarf es einer guten Wärmeübertragung im Adsorber, um die geforderte Wärmeleistung erreichen zu können. Da Zeolith eine schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzt, muss die Metall-Tragstruktur des Adsorbers den Wärmetransport übernehmen. Dazu dienen Lamellenwärmeübertrager, die mit Zeolith befüllt und ummantelt werden. Diese Adsorberbauweise beruht auf langjährigen Erfahrungen mit Adsorptionsanlagen am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik.

Der Zeolithspeicher besteht aus vier vakuumdichten Modulen, mit jeweils 10 kg Zeolith. Jedes Modul enthält einen Adsorber und einen Verdampfer (vgl. Abbildung 2), wobei der Verdampfer unterhalb des Adsorbers angeordnet ist. Folglich beinhaltet jedes Modul zwei Wärmeübertrager und besitzt vier Anschlüsse. Die Anschlüsse am Adsorber werden mit dem Hochtemperaturkreislauf verbunden. Die Verdampferanschlüsse werden mit einer Niedertemperaturwärmequelle verbunden, die die zur Verdampfung notwendige Energie bereitstellt und die bei der Kondensation freiwerdende Energie einspeichern kann. Der Dampfraum zwischen Adsorber und Verdampfer wird evakuiert und mit entgastem Wasser befüllt.



Abbildung 2 Adsorber (links), Verdampfer (mitte) und Zeolithspeichermodule (rechts)

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme der ersten vier Speichermodule (vgl. Abbildung 2, rechts) wurde dieser Prototyp im März 2010 nach München geliefert. In Aachen wurden daraufhin vier weitere, identische Zeolithfässer gebaut, um ergänzende Messungen bei anderen Lastzuständen durchführen zu können

3.1.2 Vermessung des Zeolithwärmespeichers

An der RWTH wurde ein Prüfstand aufgebaut, um den entwickelten Zeolithspeicher vor Ort testen und vermessen zu können. Abbildung 3 zeigt den unisolierten Prüfstand mit vier Zeolithspeicherfässern, Würzepfanne, elektrischer Heizung, Pumpen, Rohrleitungen und Messtechnik. Das Schaltschema der Anlage zeigt Abbildung 4. Im Prüfstand repräsentiert eine elektrische Heizung das Motorheizkraftwerk (BHKW). Die Würzepfanne ist als Wasserbehälter mit eingebauten Wärmeübertragern realisiert. Sie hat ein Fassungsvermögen von 250 l und kann auf 74 °C vorgeheizt werden. Das hierfür und für die Verdampfer im Zeolithspeicher benötigte Niedertemperaturwärmeniveau wird durch Thermostate der Firma Single bereit gestellt. Aus brautechnischen Gründen ist eine maximale Vorlauftemperatur von 120 °C für die Würzepfanne einzuhalten. Die Vorlauftemperatur muss demnach in der Anlage durch Rücklaufbeimischung eingestellt werden. Jeder Versuch wird thermodynamisch voll erfasst, so dass eine Bilanzierung der Energieströme und die Berechnung wichtiger Kennzahlen wie z. B. des Speicherwirkungsgrads erfolgen können.

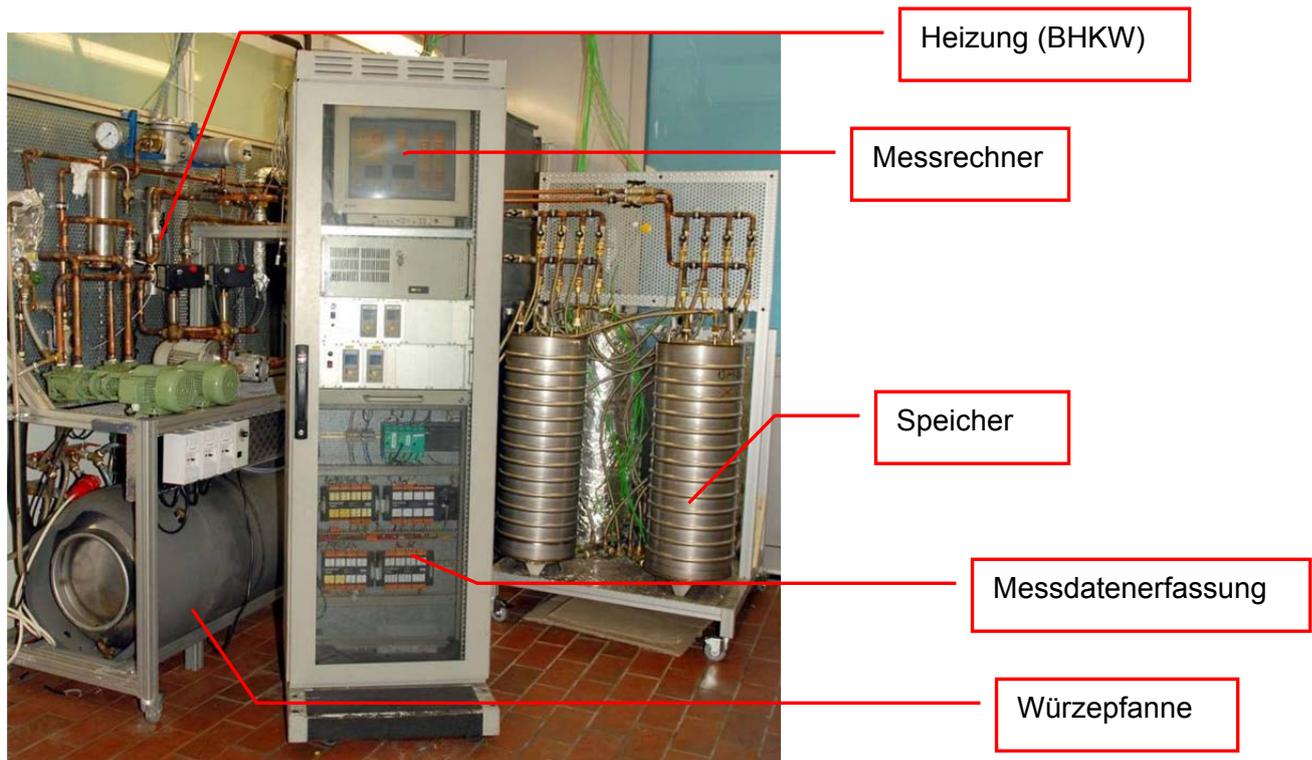


Abbildung 3 Speicherprüfstand an der RWTH Aachen

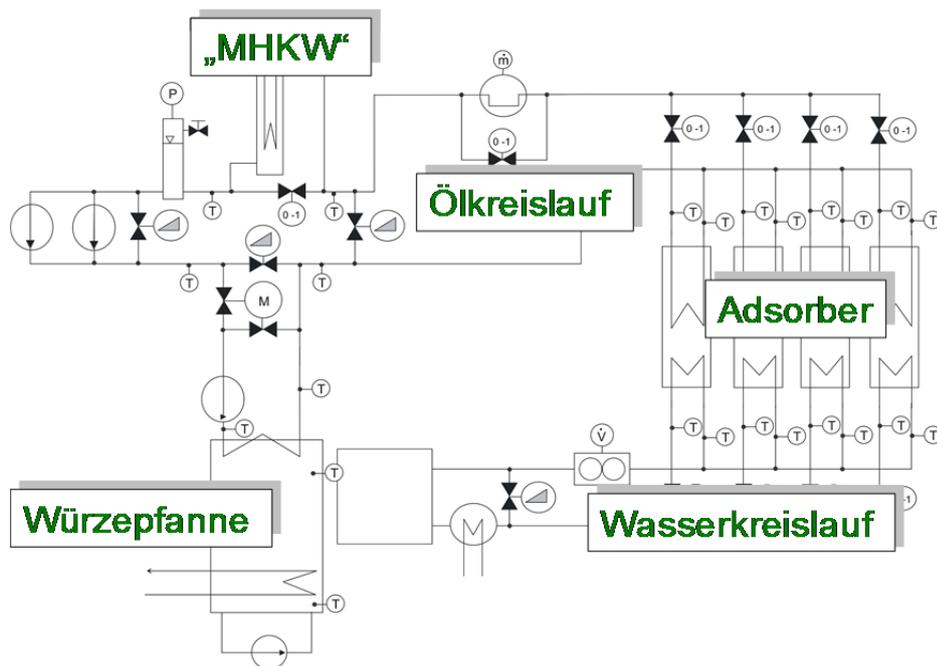


Abbildung 4 Schema des Prüfstands

Funktionsnachweis des Zeolithwärmespeichers

Die Auslegung des Wärmespeichers sieht eine fünfstündige Beladungsphase und eine einstündige Entladephase vor. Während der Beladung des Speichers werden die Zeolithfässer desorbiert, d.h. getrocknet. Dies geschieht mittels der vom „BHKW“ eingebrachten Heiz-

leistung von 2 kW. Abbildung 5 zeigt den Temperaturverlauf einer Desorptionsphase (Beladung des Speichers) am Prüfstand.

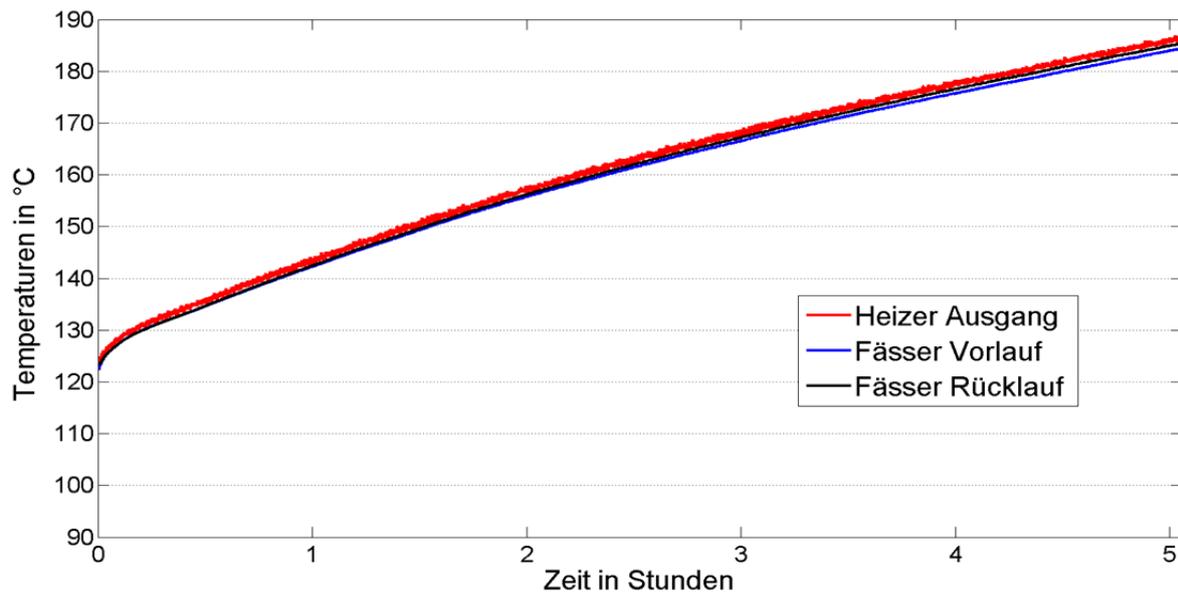


Abbildung 5 Desorptionsphase am Speicherprüfstand

Die maximale Auslegungstemperatur von über 200 °C konnte im Prüfstand zunächst nicht erreicht werden, wie Abbildung 5 zeigt. Dennoch sind die Wärmemengen und die Leistung ausreichend, um die erforderliche Aufheizung der Würzepfanne zu bewerkstelligen, wie die Messergebnisse in Abbildung 6 deutlich zeigen.

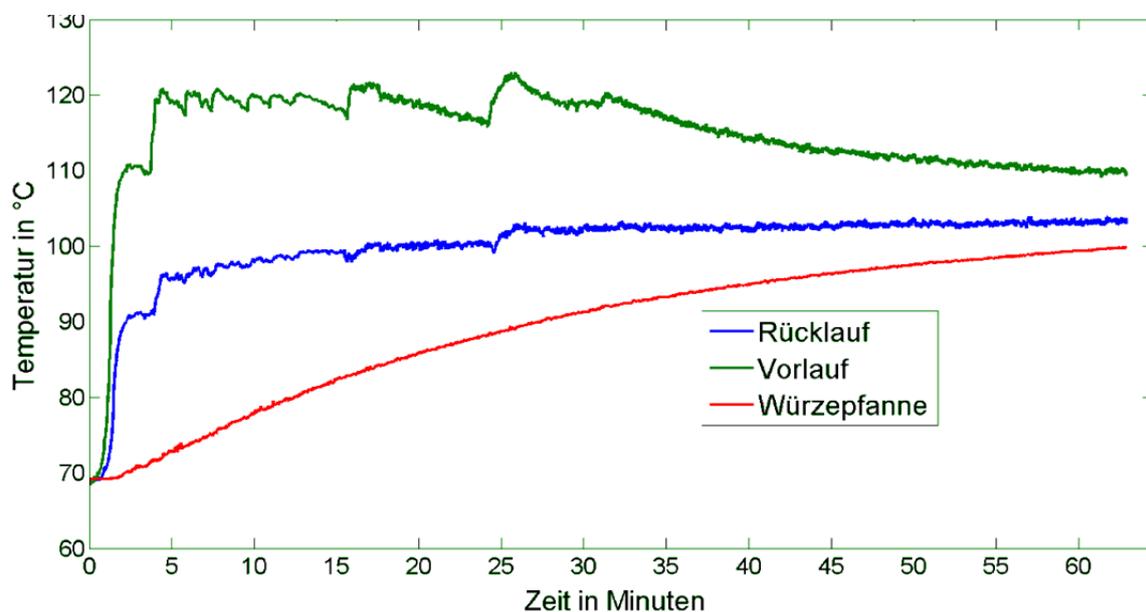


Abbildung 6 Adsorptionsphase am Speicherprüfstand

Es ist zu erkennen, dass die Würzepfanne innerhalb einer Stunde von 70°C auf 100°C aufgeheizt wird und der erforderliche Temperaturhub von 25°C mühelos erreicht wird. Somit ist der Zeolithspeicher ausreichend dimensioniert. Nachdem die grundsätzliche Funktionstüchtigkeit des Speichers gezeigt wurde, wurden in weiteren Messungen sowohl die Speichergröße, als auch die Randparameter variiert.

Energetische Bilanzierung des Speichervorgangs

Die auf Seite 14 beschriebene Auslegung der Speichergröße berücksichtigt lediglich die Adsorptionswärme des Zeolithen. Zur vollständigen Bilanzierung muss hierzu noch die Änderung des sensiblen Anteils der inneren Energie berücksichtigt werden, sowohl des Zeolithen selber, als auch des Behälters und des adsorbierten Wassers, mit mittlerer Beladung x_m .

$$\Delta U_{\text{sens}} = (T_{\text{ads,start}} - T_{\text{ads,ende}}) \cdot [c_{\text{Behälter}} \cdot m_{\text{Behälter}} + c_{\text{zeo}} \cdot m_{\text{zeo}} + (c_{\text{W}} \cdot m_{\text{zeo}} \cdot x_m)]$$

Somit addiert sich die nutzbare Wärme beim Speicherentladen aus Adsorptionsanteil und sensiblem Anteil:

$$Q_{\text{Nutz}} = \Delta h_{\text{Ads}} \cdot \Delta x \cdot m_{\text{zeo}} + \Delta U_{\text{sens}}$$

Sowohl die Adsorptionsenthalpie als auch die Beladungsänderung und mittlere Beladung sind dabei abhängig von den Temperaturen im Speicher. Analog gelten diese Überlegungen und Gleichungen für die Aufladung des Speichers, die Desorption. Die Beladungsänderung wiederum bestimmt die notwendige Wärmemenge für Verdampfung und Kondensation:

$$Q_{\text{verd/kond}} = \Delta m_{\text{W,ads}} \cdot \Delta h_{\text{verd}} \quad \text{mit} \quad \Delta m_{\text{W,ads}} = m_{\text{zeo}} \cdot \Delta x$$

Auf Basis der Überlegungen zur Nutzwärme des Systems wurde zur Optimierung des Speichers hinsichtlich seiner Speicherdichte in Aachen am Prüfstand die Speichergröße reduziert. Die Verringerung der thermischen Massen im Speicher durch Reduktion der Speichergröße auf zwei Module führt dazu, dass die Auslegungstemperatur im Speicher von über 230 °C erreicht werden konnte, wie in der Abbildung 7 zu sehen ist. Durch die höhere Temperatur zum Ende der Desorption erhöhen sich sowohl der sensible Anteil der gespeicherten Wärme, als auch die gespeicherte Adsorptionswärme. Die Verschiebung des Endzustandes der Desorption hin zu höheren Temperaturen entspricht einer größeren Beladungsänderung des Zeolithen, wodurch die Speicherdichte des Materials ansteigt.

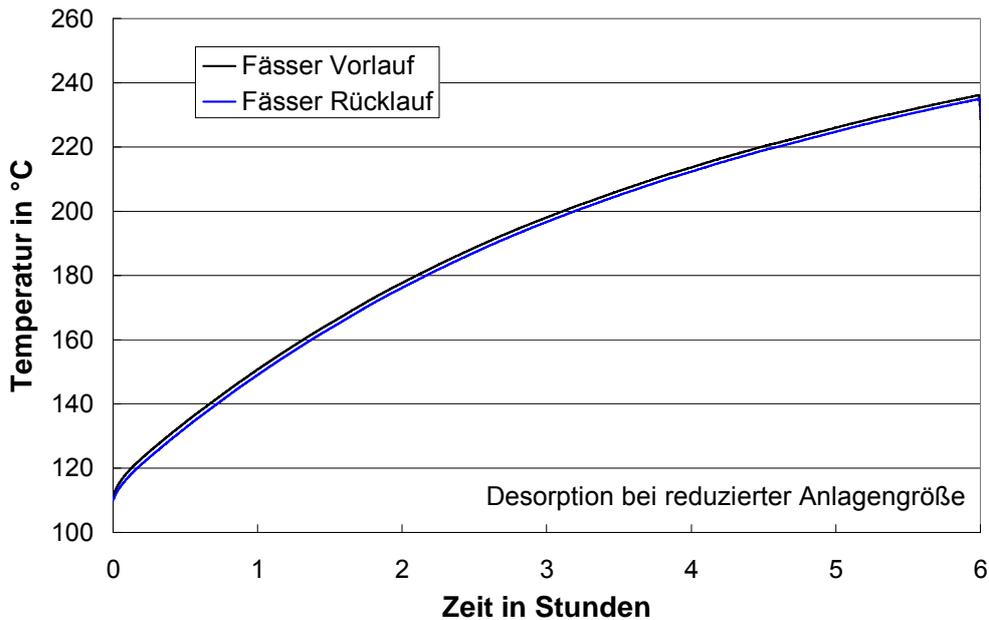


Abbildung 7 Desorptionsphase bei reduzierter Anlagengröße am Speicherprüfstand

Die in Abbildung 8 dargestellte Aufheizung der Würzepfanne belegt, dass die geforderte Aufheizung von 74 auf 99 °C erreicht wird.

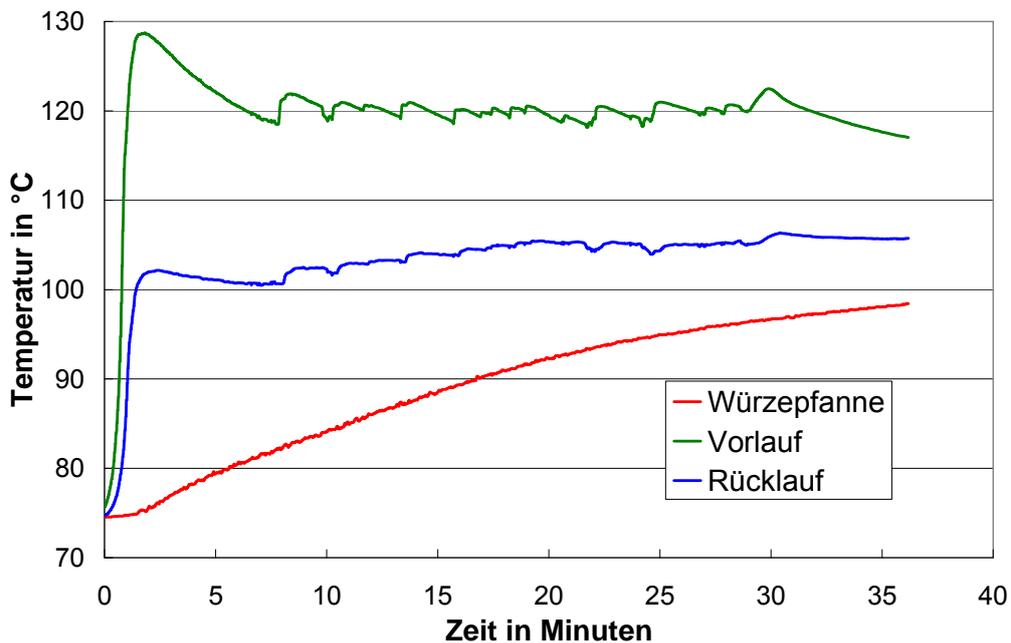


Abbildung 8 Adsorptionsphase bei reduzierter Anlagengröße am Speicherprüfstand

Durch die höhere Desorptionstemperatur bei der Speicherbeladung ist die gespeicherte Wärmemenge also ausreichend groß, obwohl die Menge speicherfähigem Materials verringert wurde im Vergleich zu der Messung aus Abbildung 5. Der Grund hierfür ist die Reduktion der thermischen Masse des Adsorbens was zu einer höheren Speichertemperatur und damit einer größeren Beladungsänderung des Zeolithen führt. So kann pro Speichervolumen eine größere Menge Wärme gespeichert werden.

Abbildung 8 zeigt außerdem, dass die Leistungen, die während der Adsorptionsphase vom Adsorptionswärmespeicher abgegeben werden, genügen, um die Würzepfanne sogar schneller als nötig aufzuheizen. Der Speicher hat also eine ausreichend hohe Leistungsdichte und ist nicht durch den Wärmetransport in der Zeolithschicht beschränkt. Durch Reduktion der Anlage von vier auf zwei Module konnte somit die Auslegungstemperatur während der Desorption erreicht und gleichzeitig eine ausreichende Wärmemenge bei außerordentlich hoher Speicherleistung abgerufen werden. Die Messergebnisse zeigen sogar, dass weiteres Optimierungspotential besteht.

Messung des Betriebsverhaltens

Während des Betriebes in der Brauerei soll der Speicher zyklisch be- und entladen werden. Aus diesem Grund wurden am Prüfstand in Aachen zyklische Messungen durchgeführt, das heißt zwei Speichervorgänge wurden ohne Unterbrechung direkt hintereinander vermessen. Um die Messungen binnen eines Arbeitstages durchführen zu können, mussten die Randbedingungen des Speichervorgangs dahingehend verändert werden, dass zwei vollständige De- und Adsorptionszyklen in insgesamt maximal 8 h möglich wurden. Folglich wurden nur zwei Module des Speichers verwendet, die Desorptionsendtemperatur auf 200 °C beschränkt, und die Adsorption bei 110 °C beendet, unbeachtet dessen, ob die Würzepfanne bereits vollständig aufgeheizt war. Dadurch konnten vergleichbare Messbedingungen geschaffen werden, die dazu dienen, die Betriebseigenschaften der Speicher bei verschiedenen Fahrweisen zu prüfen und zu verbessern.

Abbildung 9 zeigt eine Messung mit zwei Zyklen hintereinander. Deutlich zu sehen ist die kürzere Zeit, die zur Desorption in Phase 2 benötigt wird. Während der zweiten Phase der Messung kann daher ein etwas höherer Wirkungsgrad festgestellt werden. Die Ursache dafür ist, dass während des zweiten Teils der Messung die sensiblen Massen des Prüfstands bereits auf Betriebstemperatur sind und somit die benötigte Wärme für die Desorption sinkt. Dadurch verkürzt sich die Dauer der Desorptionsphase, siehe Abbildung 9. Im Gegensatz dazu bleibt die abgegebene Wärme bei der Adsorption nahezu konstant.

Zusätzlich zu diesem positiven Effekt während der zyklischen Messungen kann eine stabile Leistungsfähigkeit des Speichers festgestellt werden. Der Speicher wurde im Laufe des Projekts über mehr als 65 Zyklen und damit mehr als 350 Stunden getestet ohne dass eine Verringerung der Leistungsfähigkeit des Speichers festgestellt wurde. Die Dauerbelastbarkeit des Adsorptionsmaterials konnte also gezeigt werden.

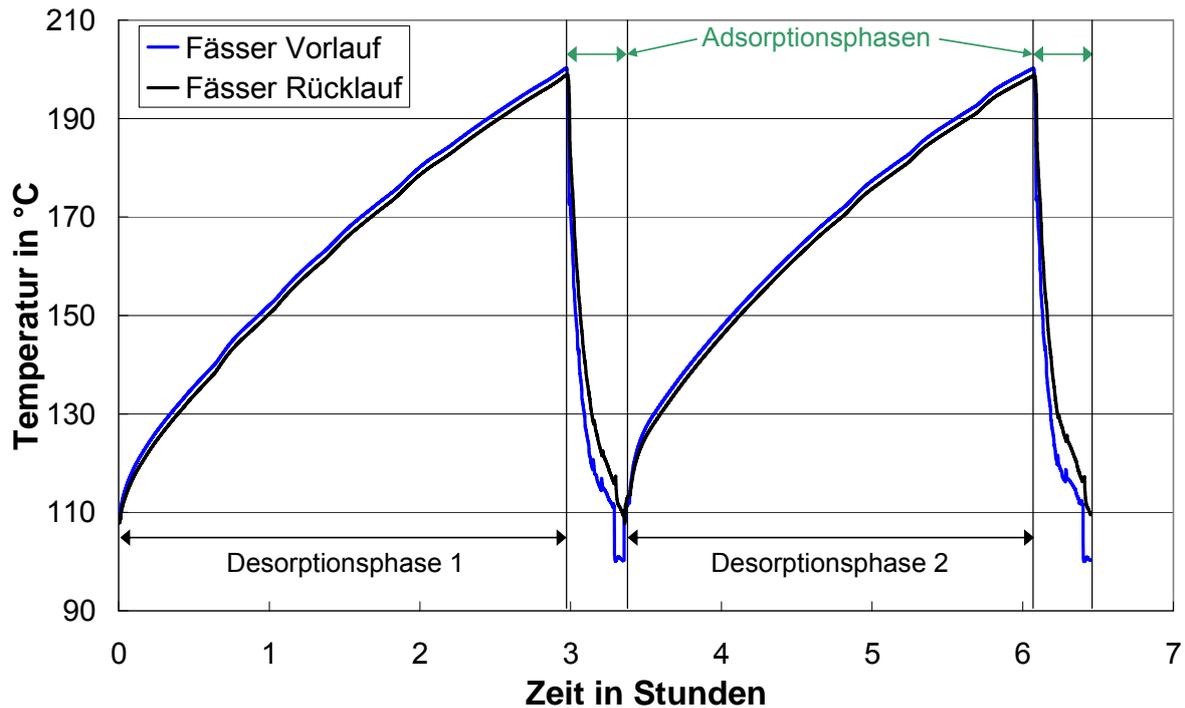


Abbildung 9 Hochtemperaturkreislauf bei zyklischer Messung am Speicherprüfstand

Speicher-Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad eines Wärmespeichers ergibt sich aus dem Verhältnis von nutzbarer zu aufgewendeter Wärme. Zur Bewertung von Adsorptionsspeichern müssen die unterschiedlichen Temperatur-Niveaus der Wärmeströme in Adsorber und Verdampfer (Hochtemperatur und Niedertemperatur) berücksichtigt werden. Ein Wirkungsgrad, der aus einer einfachen Gesamtbilanz um den Speicher berechnet wird, ist daher nicht aussagekräftig, da hierbei die Temperatur-Niveaus nicht bewertet werden können. Daher soll im Rahmen dieses Projekts zwischen einem Hochtemperatur-Wirkungsgrad und einem Niedertemperatur-Wirkungsgrad unterscheiden werden, um bei der Auslegung des Modellsystems (siehe Abschnitt 3.4) das Verhältnis aus aufgewendeter und dem Speicher entziehbarer Wärme getrennt nach Temperaturniveaus berücksichtigen zu können. Dazu werden die HT- und NT-Wärmeströme getrennt voneinander bilanziert und verglichen. Die Wirkungsgrade des Adsorptionswärmespeichers werden anhand der am Speicherprüfstand in Aachen durchgeführten Messungen berechnet. Bilanziert wird hierbei über die Massenströme der Wärmeträger Öl (Adsorber) und Wasser (Verdampfer) sowie die Ein- und Austrittstemperaturen in die Bauteile. Die beiden Wirkungsgrade können dann wie folgt berechnet werden:

$$\eta_{HT} = \frac{Q_{ads}}{Q_{des}} \quad \text{mit}$$

$$Q_{ads/des} = \int_{ads/des,Start}^{ads/des,Ende} [T_{ab}(t) - T_{zu}(t)] \cdot c_{\text{Öl}}(T) \cdot \dot{m}_{\text{Öl}}(t) \cdot dt \quad \text{und}$$

$$\eta_{\text{NT}} = \frac{Q_{\text{kond}}}{Q_{\text{verd}}} \quad \text{mit}$$

$$Q_{\text{verd/kond}} = \int_{\text{ads/des,Start}}^{\text{ads/des,Ende}} [T_{\text{ab}}(t) - T_{\text{zu}}(t)] \cdot c_{\text{W}}(T) \cdot \dot{m}_{\text{W}}(t) \cdot dt .$$

Für die Auslegung des Speichers zum Einsatz im Brauprozess ist an erster Stelle die Wärmemenge im Hochtemperaturbereich während der Adsorption relevant, da diese den Zweck des Speichers, das Aufheizen der Würze, erfüllt. Der Hochtemperatur-Wirkungsgrad stellt also das Verhältnis der für den Kochvorgang nutzbaren Wärme zu der aus dem BHKW Abgas aufgewendeten Wärme dar.

Die Niedertemperaturwärmen des Speichers werden mit den Prozessen im Brauprozess ausgetauscht, die unterhalb 90 °C stattfinden. Daher ist der Niedertemperatur-Wirkungsgrad nicht für die Auslegung, sondern für die Einbindung des Speichers in den Brauprozess im Niedertemperaturbereich relevant.

Bei der Messung in Abbildung 8 wurde im Verdampfer sowohl während der Verdampfung als auch während der Kondensation ein konstantes Temperaturniveau um 90 °C eingehalten. Hierbei handelt es sich um das obere Temperaturniveau der Niedertemperatur-Wärmeverbraucher im Sudhaus. Die Hochtemperatur-Wirkungsgrade der Messungen mit 90 °C im Niedertemperaturbereich ergaben sich dabei zu 68 %. Für die Niedertemperatur wurde der Wirkungsgrad zu 45 % bestimmt.

Die Reduktion der Speicherwirkungsgrade resultiert vor allem aus Wärmeverlusten an die Umgebung, wenn der Speicher auf hohe Temperaturen aufgeheizt wird. Dies gilt im betrachteten Anwendungsfall sowohl im Adsorber, als auch im Verdampfer, da auch dieser für den Brauprozess bei Temperaturen weit über der Umgebung betrieben wird.

Ein Vergleich der realen Wärmeverluste aus den Messungen mit berechneten Wärmeverlusten soll an dieser Stelle der Bewertung der Wirkungsgrade dienen. Der Einfachheit halber werden die Gesamtwärmeverluste des Speichers betrachtet. Dazu wird ein Gesamtwirkungsgrad des Speichervorgangs definiert, der die nutzbaren Wärmen zu den aufgewendeten ins Verhältnis setzt:

$$\eta_{\text{gesamt}} = \frac{Q_{\text{Nutzen}}}{Q_{\text{Aufwand}}} = \frac{Q_{\text{ads}} + Q_{\text{kond}}}{Q_{\text{des}} + Q_{\text{verd}}}$$

Für die Messung bei 90 °C im Niedertemperaturbereich ergibt sich danach ein Gesamtwirkungsgrad von 64 %. Die Wärmeverluste des Speichers Q_{Verluste} während der gesamten Betriebsdauer ergeben sich aus der Differenz zwischen den aufgewendeten Wärmen Q_{des} sowie Q_{verd} und den nutzbaren Wärmen Q_{ads} sowie Q_{kond} :

$$Q_{\text{Verluste}} = Q_{\text{Aufwand}} - Q_{\text{Nutzen}} = Q_{\text{des}} + Q_{\text{verd}} - (Q_{\text{ads}} + Q_{\text{kond}})$$

Daraus kann ein mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient kA für den Wärmeverlust bestimmt werden:

$$kA = \frac{Q_{\text{Verluste}}}{T_{\text{Adsorber}} - T_{\text{Umwelt}} \Delta t}$$

Hierbei wurde die mittlere Temperatur des Moduls gleich der mittleren Adsorbentemperatur gesetzt und die Umgebungstemperatur zu 20 °C. Für die Messungen ergibt sich damit ein Wärmedurchgangskoeffizient pro Modul von $kA_{\text{Mess,Modul}} = 1,83 \text{ W/K}$.

Zum Vergleich kann ein, mit der vorhandenen Wärmedämmung zu erwartender, theoretischer Wärmedurchgangskoeffizient kA_{theo} berechnet werden. Auf der Innenseite des Moduls ist aufgrund möglicher Kondensation des Wasserdampfes ein relativ hoher Wärmeübergang zu erwarten. Zur Abschätzung des theoretischen kA_{theo} -Werts wird daher der Wärmeübergangswiderstand auf der Modulinnenseite vernachlässigt (idealer Wärmeübergang) und lediglich der Wärmetransport durch die Isolation und ein äußerer Wärmeübergang berücksichtigt. Nicht-idealer Wärmeübergang auf der Modulinnenseite würde den kA_{theo} -Wert lediglich weiter verringern, somit handelt es sich um eine Abschätzung hin zu höheren Wärmeverlusten. Auf der Außenseite wird der Wärmeübergangskoeffizient α nach dem VDI Wärmeatlas [11] bestimmt. Hierbei wird die Temperatur der Außenfläche der $d = 5 \text{ cm}$ dicken Isolation wird zu 40 °C angenommen. Als Wärmeleitwert λ der zur Isolation verwendeten Glaswolle werden 0,06 W/mK [13] zugrunde gelegt. Die Fläche A ist die Außenfläche eines Moduls.

$$\frac{1}{kA_{\text{theo}}} = \frac{\delta}{\lambda \cdot A} + \frac{1}{\alpha A}$$

Damit ergibt sich ein aus der Theorie zu erwartender kA_{theo} -Wert von 1,11 W/K für die verwendete Isolation. Mögliche Ursachen für die Diskrepanz zwischen gemessenem und erwartetem kA -Wert sind Wärmebrücken oder eine herabgesetzte Wärmedämmung durch eine ölgetränkte oder anderweitig beeinträchtigte Isolationsschicht. Die Verlustquellen konnten nicht vollständig identifiziert werden. Daher sollten in weiterführenden Untersuchungen an den Speichermodulen die Wärmeverluste genauer quantifiziert und die zugrunde liegenden Mechanismen erforscht werden.

Mit dem berechneten Wert von kA_{theo} kann die Verlustwärme $Q_{\text{Verluste,theo}}$ bestimmt werden, die aufgrund der verwendeten Isolation zu erwarten war. Damit ergibt sich für den Adsorptionswärmespeicher ein theoretischer Gesamtwirkungsgrad von mindestens 74,5 %. Die Isolation der Speichermodule bietet hier erhebliches weiteres Verbesserungspotenzial. Unter der Annahme einer Vakuumsuperisolation mit $\lambda = 0,001 \text{ W/mK}$ [14] bei gleichbleibender Dicke wird ein theoretischer Gesamtwirkungsgrad von mindestens 93,2 % erreicht.

Abbildung 10 zeigt den Einfluss der Isolation auf den Gesamtwirkungsgrad des Wärmespeichers. Sowohl die Isolationsschichtdicke d , als auch der Wärmeleitwert λ können variiert werden. Gut zu erkennen ist, dass durch Verbesserung der bisher verwendeten Isolation mit $\lambda/d = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ noch eine weitere Steigerung des Wirkungsgrads möglich ist.

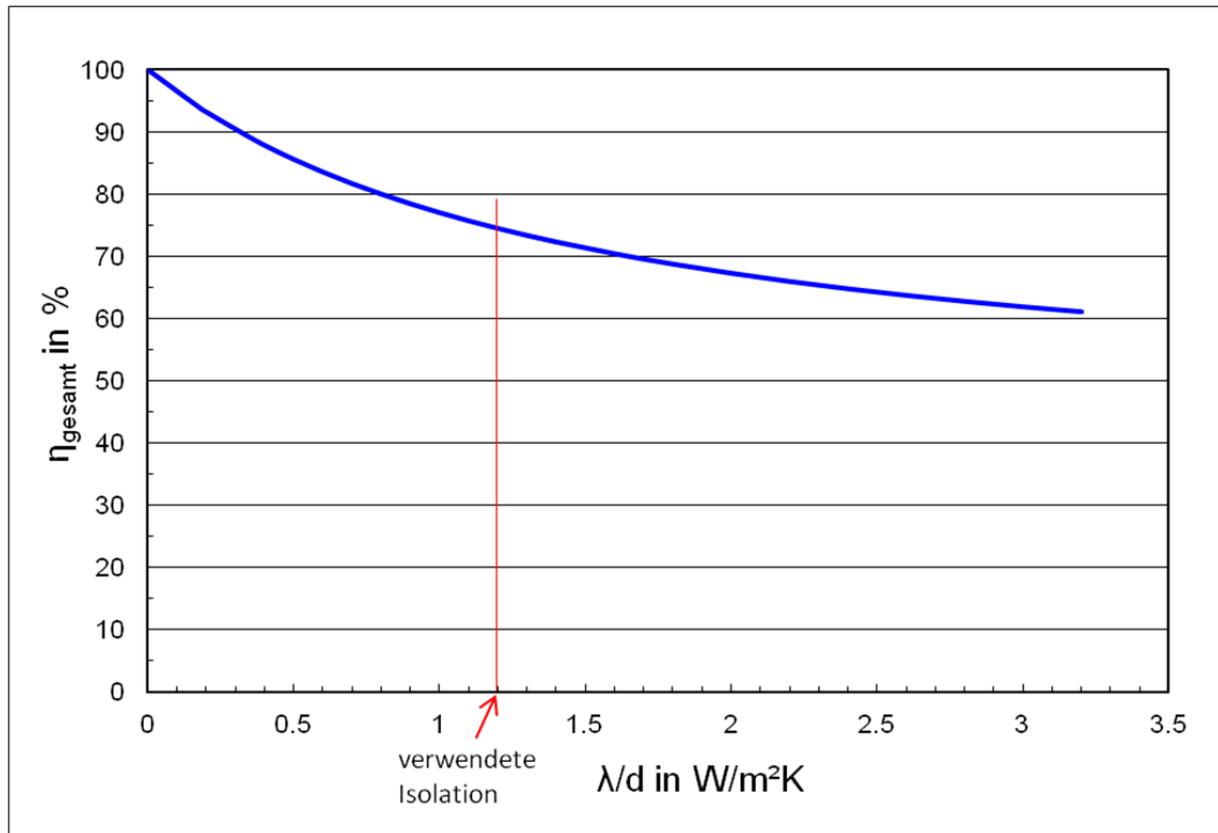


Abbildung 10 Theoretischer Wärmespeicher-Gesamtwirkungsgrad in Abhängigkeit von der Isolation

In die spätere Modellierung und Auslegung des Zeolithspeichers in der Modellbrauerei gehen die aus den Messungen gewonnenen Erkenntnisse ein. Dazu wurden die gemessenen Wärmemengen während der Ad- und der Desorptionsphase mit theoretisch berechneten Werten anhand der Gleichungen auf Seite 18 verglichen. Dabei zeigte sich, dass für die Adsorptionsphase die gemessenen Wärmen mit den berechneten gut übereinstimmen, während die gemessene Desorptionswärme durch die Wärmeverluste deutlich erhöht ist. Die unterschiedliche Dauer der Speicherphasen von 5 h bzw. 1h für Be- und Entladung (De- und Adsorption) sowie die durchschnittlich niedrigere Adsorbtemperatur in der Entladephase, führen dazu, dass die Wärmeverluste während der Adsorption wesentlich geringer sind. Aus diesem Grund wird die nutzbare Adsorptionswärme für die Modellierung aus den thermodynamischen Gleichungen berechnet und anhand dieser Wärmemenge wird die notwendige Größe des Speichers bestimmt. Die notwendige Desorptionswärme kann dann mittels des aus den Messungen bestimmten Wirkungsgrads nach oben korrigiert werden. Da, wie oben gezeigt wurde, noch erhebliches Verbesserungspotenzial bei der Wärmedämmung des Speichers besteht, sind die Berechnungen der Modellbrauerei daher konservativ.

Neben den Ad- und Desorptionstemperaturen, wie bereits gezeigt, haben auch die Wahl der Verdampfer- und Kondensatortemperatur erheblichen Einfluss auf die Speicherkapazität eines Adsorptionswärmespeichers und die sich ergebenden Wirkungsgrade für Speicher Be- und Entladung. Im Weiteren wurde daher der Einfluss der Niedertemperatur auf den Speichervorgang untersucht.

Einfluss der Niedertemperaturwärme auf Wirkungsgrad und Kapazität

Bei den abschließenden Messreihen des Projekts in Aachen wurden die Verdampfer- und Kondensatortemperaturen variiert, siehe Tabelle 1. Diese Temperaturpaarungen ergeben sich aus den im Brauprozess auftretenden Nutztemperaturniveaus. So besteht beispielsweise die Möglichkeit, die Kondensatorabwärme zur Bereitstellung des Maischwassers zu nutzen, wobei dann 60 °C Nutztemperatur ausreichend sind. Um hingegen aus dem Kondensator den Warmwasserspeicher beladen zu können, müssen mindestens 90 °C bereitgestellt werden. Andersherum ermöglicht das BHKW-Kühlwasser eine Verdampfung bei 90 °C. 60 °C im Verdampfer sind als untere Grenze der Nutztemperaturen immer mittels des Warmwasserspeichers verfügbar.

Durch die Wahl des Niedertemperaturniveaus wird der Druck im Speicher festgelegt. Dieser wiederum bestimmt zusammen mit den Ad- und Desorptionstemperaturen die mögliche Beladungsänderung des Adsorbens. Dabei gilt, je höher der Verdampferdruck und je niedriger der Kondensatordruck, desto größer die Beladungsänderung und damit die Kapazität des Speichers. Die Speicherdichte ist also für Kombination 1 am höchsten und für Kombination 2 am niedrigsten. Dennoch verfügt der Zeolithspeicher über eine hohe Flexibilität der Temperaturen im Niedertemperaturkreislauf und kann, je nach Vorgabe des Brauprozesses, mit unterschiedlichen Temperaturen betrieben werden.

Die Adsorbermodule haben jeweils ein Volumen von knapp 27 Litern, mit 2 genutzten Modulen ergibt sich also ein Speichervolumen von 0,054 m³. Zur Berechnung der gemessenen Speicherdichte wird die folgende Gleichung herangezogen:

$$\Delta h_{\text{sp,zeo}} = \frac{Q_{\text{ads}}}{V_{\text{Adsorber}}}$$

Wobei hier die gemessene, während der Adsorption freigesetzte Wärme zugrunde gelegt wird. Die Werte für die Wirkungsgrade sowie die erzielte Speicherdichte sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1 Speicherdichte (bezogen auf das Volumen der Adsorbermodule) und Wirkungsgrade bei Temperaturvariation des Niedertemperaturkreislaufs

Temperaturpaarungen	Kondensatortemperatur	Verdampfer-temperatur	Speicherdichte in kWh/m ³	η_{HT}	η_{NT}
Kombination 1	60°C	90°C	61,7	0,78	0,79
Kombination 2	90°C	60°C	31,5	0,5	-
Kombination 3	90°C	90°C	48,7	0,68	0,45

Bei den Ergebnissen der Messungen zum Niedertemperatureinfluss ist im Hinblick auf den Brauprozess wichtig zu vermerken, dass die Wärmen am Prüfstand von Thermostaten abgeführt und geliefert wird. Die abrupte Änderung der Temperaturniveaus ist für die Thermostaten schwer zu bewerkstelligen. Hier wurden am Prüfstand Leistungsbeschränkungen festgestellt, weshalb unter anderem kein Niedertemperaturwirkungsgrad für die Kombination 2-Messungen bestimmt werden konnte. Im realen Prozess werden die Wärmeströme durch den Warmwasserspeicher bereitgestellt. Hierdurch sind sowohl Temperatur- als auch Leistungsschwankungen möglich, die den Speicher sowohl positiv als auch negativ beeinflussen können.

Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass die Wahl der Niedertemperaturwärme einen erheblichen Einfluss auf sowohl die Speicherdichte als auch die Wirkungsgrade hat. Beispielsweise führt eine niedrige Kondensatortemperatur sowohl zu reduzierten Wärmeverlusten durch Kondensation an den Behälterwänden, als auch zu einem höheren Trocknungsgrad während der Desorption. Dadurch lassen sich Effizienz und Speicherdichte steigern, siehe Tabelle 1. Es kann trotz der Wirkungsgradeinbußen durchaus sinnvoll sein, eine niedrige Verdampfer-temperatur zu wählen, wenn Abwärme für die Verdampfung zur Verfügung steht. Ebenso kann eine höhere Kondensationstemperatur sinnvoll sein, wenn die Wärme auf höherem Temperaturniveau gebraucht wird. In diesem Zusammenhang muss immer der Gesamtprozess mitsamt der Einbindung der Niedertemperaturwärmeströme betrachtet werden, um Aussagen darüber treffen zu können, welche Parameter geeignet sind, eine maximale Energieeinsparung zu ermöglichen.

Zusammenfassung Zeolithwärmespeicher

Der Zeolithwärmespeicher für den Einsatz in einer Verfahrenskombination mit BHKW und SchoKo wurde nach Vorgaben des Brauprozesses in Aachen konzeptioniert, gebaut und erfolgreich vermessen. Die Messungen am Speicherprüfstand in Aachen zeigen, dass der Zeolithwärmespeicher seine Funktion als Wärmespeicher für die Abgaswärme des BHKW voll erfüllt und die für den Prozess erforderliche Lastverschiebung gut bewerkstelligt. Der Speicher eignet sich insbesondere für den Einsatz in einem Brauprozess, da die Niedertemperaturwärmeströme bei für den Prozess relevanten Temperaturen ein und ausgekoppelt werden können.

Erste Ergebnisse vom Speicherprüfstand wurden bereits 2011 auf dem Thermodynamik-Kolloquium der DECHEMA und der VDI GVC als Poster veröffentlicht. Als weitere Veröffentlichungen folgen ein Vortrag auf der Fachtagung „Innovation bei der Speicherung und dem Transport von Wärme und Biogas“ am 26. September 2012 in Dortmund sowie ein Poster bei der International Renewable Energy Storage Conference (IRES) im November 2012 in Berlin. Eine Publikation in einer wissenschaftlichen Fachzeitschrift ist im Anschluss an den Projektabschluss geplant.

3.2 Konzeption und Betrieb der Verbundanlage

Nach der erfolgreichen Charakterisierung des Speichers in Aachen wurde die gesamte Verfahrenskombination aus Zeolithwärmespeicher, BHKW und Schonkocher in einer Verbundanlage in München aufgebaut. Zum Nachweis der Funktionalität des Gesamtkonzepts wurden dort entsprechende Messreihen an der Gesamtanlage durchgeführt.

3.2.1 Entwicklung und Bau des Rauchgaswärmeübertragers

Um die in den Rauchgasen enthaltene thermische Energie auf den Thermoölkreislauf zu übertragen und somit die Energie für die Aufheizung der Würzepfanne und der Desorption des Zeolith-Wärmespeichers zur Verfügung stellen zu können, wurde von der Firma Kaspar Schulz ein Gegenstrom-Rohrbündel-Wärmetauscher entworfen und gefertigt.

Wie in Abbildung 11 zu sehen, besteht der Wärmetauscher aus 37 Rohren mit einem Außendurchmesser von je 12 und einer Wanddicke von je einem Millimeter. Durch sie wird das heiße Abgas geleitet, an ihrer Außenseite fließt im Gegenstrom das Thermoöl. Ummantelt sind die Rohre von der Wärmetauscherwand (125 mm Außendurchmesser). Durch den Einsatz von Umlenklechen erzielt man eine verbesserte Strömungsführung des Thermoöls.

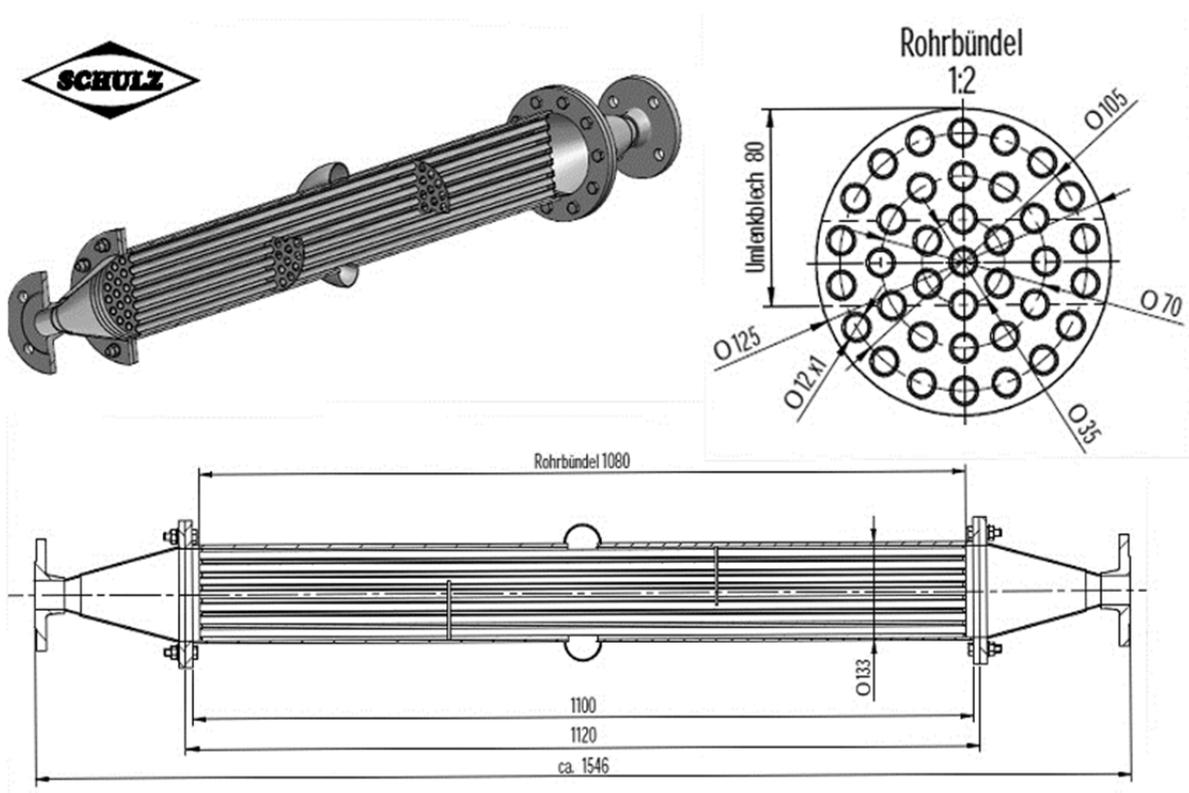


Abbildung 11 Schnittzeichnungen des Abgaswärmetauschers

Für den Wärmetauscher ergeben sich somit folgende Kenngrößen:

Wärmeübertragungsfläche, A_{WT} :

$$A_{wt} = 2 \cdot \pi \cdot n_a \cdot l_r \cdot n_r = 1,5m^2$$

r_a : Halber Außendurchmesser eines Rohres (6 mm)

l_r : Länge der Rohre (1080 mm)

n_r : Anzahl der abgasführenden Rohre (37)

Freie Durchgangsfläche des Rauchgases, A_{RG} :

$$A_{RG} = r_i^2 \cdot \pi \cdot n_r = 29cm^2$$

r_i : Halber Innendurchmesser eines Rohres (5 mm)

Thermoölinhalt des Wärmetauschers, $V_{ÖL}$ (unter Vernachlässigung der Umlenkbleche)

$$V_{öl} \approx V_{ges} - V_r$$

$$V_{öl} \approx l_r \cdot \pi [R_i^2 - (r_a^2 \cdot n_r)] = 8,7l$$

R_i : Halber Innendurchmesser des Wärmetauschers (62,5 mm)

Leistung des Wärmetauschers, \dot{Q} :

$$\dot{Q} = \dot{m}_{abg} \cdot c_{abg} \cdot (t_{ein} - t_{aus}) = 2kW$$

\dot{m}_{abg} : Abgasmassenstrom (35 kg/h)

c_{abg} : Abgas Spezifische Wärmekapazität (1,1 kJ/kg*K)

t_{ein}, t_{aus} : Abgastemperatur Ein- und Ausgang (310 °K; 130°K)

3.2.2 Entwicklung und Bau der Heißluftgebläse

Der Rauchgaswärmeübertrager hat aber keinen ausreichenden Wärmestrom bei den projektierten Temperaturen geliefert. Ursachen können Abgasgeschwindigkeit und –druck, die Geschwindigkeit des Thermalöls im Wärmeübertrager, Thermalölmenge im Abgaswärmeübertrager sowie zu große Wärmeverluste im Gesamtsystem gewesen sein. Um das Problem leichter lokalisieren und lösen zu können, wurde in den Thermalölkreislauf eine Heizpatrone eingebaut.

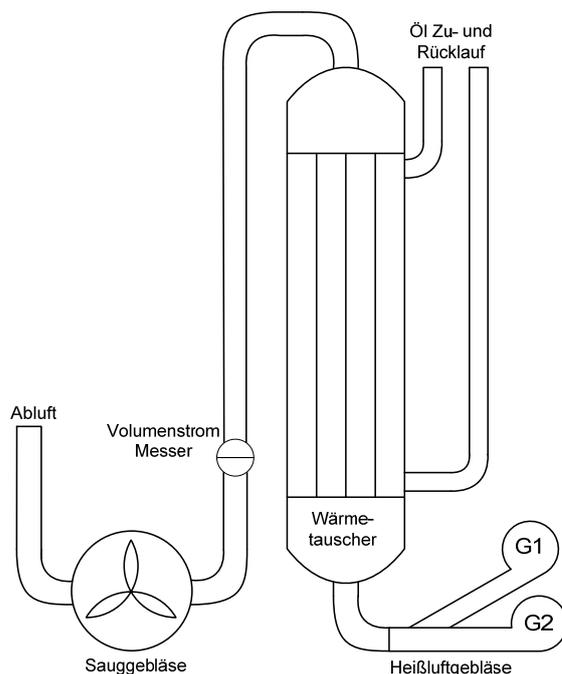


Abbildung 12 Schema der Heißluftgebläseanlage

Damit kann der Gesamtkreislauf auch unabhängig vom AbgasWÜT betrieben und dieser parallel optimiert werden. Nach Einbau der Heizpatrone wurde klar, dass man über den BHKW-Diesel Motor nicht ausreichende Energie in das Thermalöl einbringen kann. Deswegen wurde ein Heißluftsystem als Wärmequelle anstelle des BHKW-Abgaswärmetauschers installiert. Damit können die deutlich heißeren Abgase eines neueren BHKWs simuliert werden.

In dieses System sind zwei Heißluftgebläse integriert. Eines davon wurde von der Firma Leister hergestellt, Typ 9C1 mit einem Stromverbrauch von 3400 W und einem maximaler Luftvolumenstrom von 550 l/min bei einer maximalen Lufttemperatur von 650 °C. Das zweite Heißluftgebläse kommt von der Firma Steinel, Typ HL2010E, und hat ein Stromverbrauch von 2000 W. Der maximale Luftvolumenstrom liegt bei 500 l/min bei einer maximalen Lufttemperatur von 630 °C. Beide Heißluftgebläse sind vor dem Wärmetauscher eingebaut. Nach dem Wärmetauscher folgt eine Beruhigungsstrecke, um dort eine Volumenstrommessung zu ermöglichen. Weil der hydraulische Widerstand des Abgaswärmetauschers zu groß war, wurde zusätzlich ein Sauggebläse installiert, um den erwünschten Volumenstrom von Heißluft bereitstellen zu können. Das Sauggebläse hat einen nicht-regelbaren Saugvolumenstrom, der insgesamt zu groß für die Anlage ist. Um den Saugvolumenstrom, der durch den Wärmetauscher strömt, regeln zu können wurden in die Beruhigungsstrecke, nach der Luftvolumenstrommessung, zehn Falschluchtöffnungen installiert, um darüber den Volumenstrom einstellen zu können. Auf diese Weise kann der erwünschte Luftmassenstrom von 35,5 kg/h genau bereitgestellt werden. Dieser entspricht der ursprünglichen Motorauslegung. Ein einfaches Schema von dieser Anlage ist in der Abbildung 11 dargestellt.

3.2.3 Anlagenauslegung und –optimierung

SchoKo

Die Vakuumverdampfungsanlage hat eine Durchflussleistung, die von 2 bis 10 hl/h einstellbar ist. Die Verdampfungsrate ist variabel von 1-6 % einstellbar. Sie ist ausgestattet mit induktiven Durchflussmengenmessern zur Erfassung der Würzmenge vor und nach der Verdampfung, sowie des Wasserdurchsatzes am Kondensator. Die Regelung der Eindampfungsleistung erfolgt über den Wasserdurchsatz am Kondensator. Die Regelung der Durchflussleistung der Würze geschieht über die Frequenzsteuerung der beiden Würzepumpen. Die Anbindung an die Verbundanlage erfolgt über Schläuche mit Milchrohrgewinde. Aufgrund von Platzproblemen wird derzeit zur Vereinfachung ein anderes Würzegefäß verwendet.



Abbildung 13
SchoKo Versuchsanlage

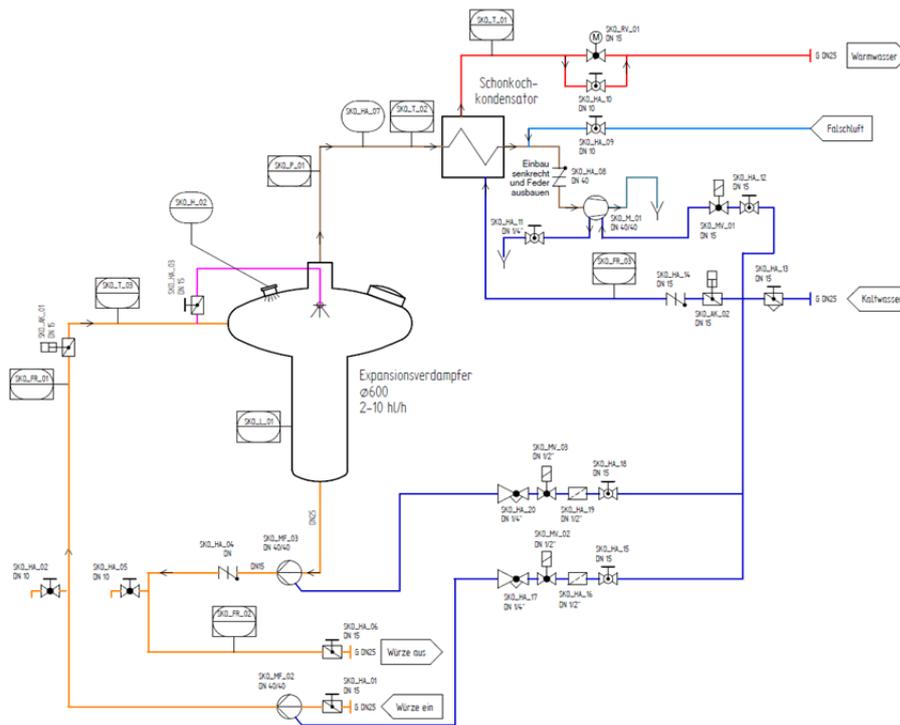


Abbildung 14 Fließbild SchoKo

BHKW

Das im Versuchsstand genutzte Blockheizkraftwerk stammt von den Vereinigten Werkstätten für Pflanzenöl (VWP). Seine maximale elektrische Leistung wird mit 5 kW angegeben, seine thermische Nennleistung liegt bei 11,5 kW, der Verbrauch bei 1,7 Liter Diesel pro Stunde. Bei dem verbauten Motor handelt es sich um einen indirekt einspritzenden Vorkammer-Dieselmotor vom Typ LDW 903 der Firma Lombardini Motori S.R.L., Reggio Emilia, Italien. Der Dreizylinder-Reihenmotor ist wassergekühlt und weist einen Hubraum von 916 cm³ auf. Seine Nenndrehzahl liegt bei 1800 Umdrehungen pro Minute. Der Motor treibt über einen Keilriemen einen luftgekühlten Asynchrongenerator vom Typ DK 132 S-2B der Oswald Elektromotoren GmbH, Miltenberg/Main, an. Dieser liefert bei einer Nenndrehzahl von 3000 Umdrehungen pro Minute, einer Spannung von 400 Volt und einer Frequenz von 50 Hertz eine maximale Wirkleistung von 7,5 kW.

Die Abgase des Dieselmotors erreichen, wegen seiner alten Technologie, keine Temperaturen über 310 °C, d.h. sie sind nicht heiß genug um den Desorptionsprozess ausreichend mit Wärme zu versorgen. Außerdem setzt der Motor sehr viel Ruß frei (siehe Abbildung 15), was sehr schlecht für den Wärmeübertrager ist. Deswegen eignen sich besser gasbetriebene Otto-Motoren, die quasi rußfreie Abgase haben mit Temperaturen über 500 °C.

Das BHKW wurde weiterhin genutzt um das notwendige Warmwasser herzustellen.



Abbildung 15 Ruß aus dem Wärmetauscher

Würzefanne

Für die Simulation der Würzekochung in einem Sudhaus wurde vorläufig zur Vereinfachung ein zylindrischer Produktbehälter aus Edelstahl mit einem Fassungsvermögen von 200 Litern von der Firma Kaspar-Schulz entworfen und gebaut. In seinem Inneren befindet sich eine Heizschnecke aus Messing, durch die das heiße Thermoöl geleitet wird. Dadurch soll der Inhalt binnen einer Stunde von 74 auf 99 °C erhitzt und für eine weitere Stunde lang gehalten werden. Für eine verbesserte Umströmung des Heizelementes sowie zur Vermeidung einer Temperaturschichtung wurde ein regelbares Rührwerk in die Würzefanne integriert.

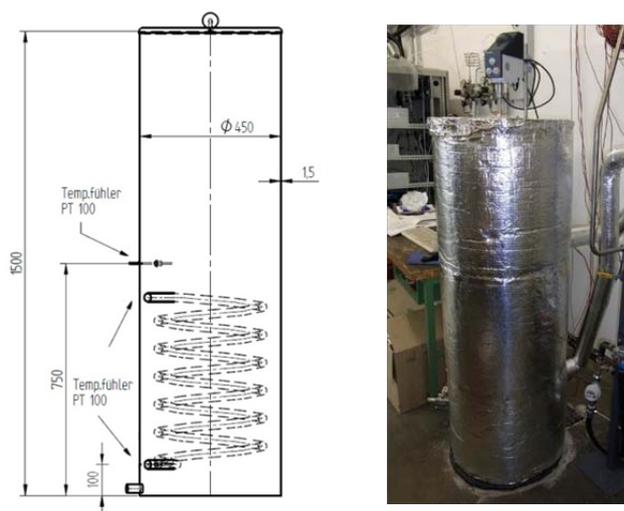


Abbildung 16 Schnittzeichnung Würzefanne und Isolierte Würzefanne mit Rührwerk

Warmwasserspeicher

Zur Speicherung der kontinuierlich anfallenden Wärme aus dem internen Kühlwasserkreislauf des BHKWs wurde ein Warmwasserspeicher in den Wasserkreislauf integriert. Dabei

handelt es sich um einen durchmischten Speicher, der mit der Würzpfanne baugleich ist. Auf die Installation eines Rührers wurde jedoch verzichtet.

Tabelle 2 *Charakteristiken vom Warmwasserspeicher*

Volumen	200 Liter
Gespeicherte Wärmemenge	40 MJ
Aufgewendeter Wärmestrom	1,7 kW
Länge des Inneren Wärmetauschers	5,6 m

3.2.4 Betrieb der Prototypen im Verbund

In Weihenstephan wurde mit der Aufbau des Versuchsstands nach einem zuvor ausgearbeiteten Plan begonnen (siehe Abbildung 18). Dazu wurden die Aufstellungsorte der Hauptkomponenten BHKW, Abgaswärmetauscher, Würzpfanne, Warmwasser- und Zeolithspeicher festgelegt. Anschließend wurde mit der Konstruktion des Thermoölkreislaufs begonnen. Bedingt durch die Konstruktion der Biegemaschine wurden Verformungen an der Außenseite der Rohre verursacht. Lagen diese im Verschraubungs- und somit im Dichtungsbereich einer Muffe, so traten durch die nicht mehr vollständige Ummantelung der Klemmringe Undichtigkeiten auf. Deshalb musste das Anlagendesign (Rohrkrümmungen und -längen) so geändert werden, dass die Verformungen keinen Einfluss mehr haben.

Für das Thermoöl-Ausdehnungsgefäß, die Thermoölpumpe und für die Volumendurchflussmessgeräte wurde eine Stützkonstruktion aus Quadratrohren zusammengeschweißt und in Wand und Boden verschraubt (siehe Abbildung 17).



Abbildung 17 *Frontansicht auf den Versuchsstand*

Die Abdichtung des Thermoölkreislaufes wurde mit Druckluft überprüft. Der zunächst rasche Druckverlust ließ auf Undichtigkeiten im Bereich der Verschraubungen der zahlreichen Ventile schließen. Diese Leckagen konnte mit Seifenwasserlösung identifiziert werden. Als Konsequenz musste ein Teil der Kupferdichtungen gegen Viton-Dichtungen ausgetauscht werden und das System war nun bis zu 3 bar Überdruck dicht.

Der Thermoölkreislauf, der Abgaswärmetauscher, die Würzepfanne, der Warmwasserspeicher und das Thermoöl-Ausdehnungsgefäß wurden mit Steinwollmatten isoliert.

Die Pumpen wurden mit leistungsangepassten Frequenzumformern versehen, die großzügiger Weise von der Firma Rockwell Automation zur Verfügung gestellt wurden. Ein Vorteil der Frequenzumrichter ist die genaue und einfache Regelung der Pumpendrehzahl über die Frequenz des Ausgangssignals. Hierdurch ist eine exakte Einstellung der Massenströme möglich.

Der Motor des BHKWs wurde überholt (Ölwechsel, Öl- und Kraftstofffilter getauscht, Keilriemen, Kraftstoffpumpe, Einspritzpumpen). Abschließend wurde ein Temperaturfühler in den Abgasweg des Motors verbaut und die Abgaszuleitung vom Motor zum Abgaswärmetauscher neu isoliert.

Bei Testläufen wurde das Blockheizkraftwerk mit Frischwasser aus der Leitung gekühlt und die gewonnene Abwärme über den Kanal abgeführt. Um diese Abwärme mengenmäßig erfassen und speichern zu können, wurde mit dem Aufbau eines Wasserkreislaufes begonnen. Dazu wurden Schläuche verlegt und eine Verteilerstation aus einer Kombination von drei Dreiwegehähnen aufgebaut. Zusätzlich wurden an wichtigen Punkten Wasseruhren sowie Thermofühler verbaut. Ähnlich wie im Thermoölkreislauf wurde ein Ausdehnungsgefäß zur Befüllung, Entlüftung und Expansion des Wassers am höchsten Punkt des Systems integriert.

Um Aussagen über die Effizienz der Verfahrenskombination treffen zu können, benötigt man Messdaten über die im System herrschenden Temperatur-, Druck- und Volumenstromverhältnisse.

Dazu wurden entsprechende Sensoren an messtechnisch wichtigen Punkten eingebaut und mit einer Messwerterfassungsanlage verbunden. Die Visualisierung erfolgt mit der WinControl Software der Firma Akrobit Software. Ausgewertet werden die Datensätze in Excel. Der zu erbringende Messaufwand ist zeitlich erheblich, weil jede der Messungen mit An- und Abfahrvorgang zwischen 8 und 10 Stunden dauert.

Viele Versuche wurden durchgeführt in denen unterschiedliche Parameter variiert wurden und verschiedene Versuchsweisen eingesetzt wurden.

Die Messungen sind in mehrere Teile zu gliedern, wobei die Messungen teilweise parallel stattgefunden haben:

- Validierung des Messaufbaus hinsichtlich Messergebnisse
- Leistungsbestimmung des Abgaswärmeübertragers in Abhängigkeit von Öl-Ein- und –Austrittstemperaturen einhergehend mit dem Ersatz des Wärmeübertragers im Rauchgasstrom
- Aufnahme der Leistungsprofile der beiden Wärmeübertrager im Rauchgasstrom zur Beschreibung der Veränderung der Leistungsauskopplung in Abhängigkeit vom Ad- und Desorptionsprozess
- Beschreibung der Be- und Entladezyklen der Zeolithspeicher in Kombination mit dem BHKW-Betrieb.

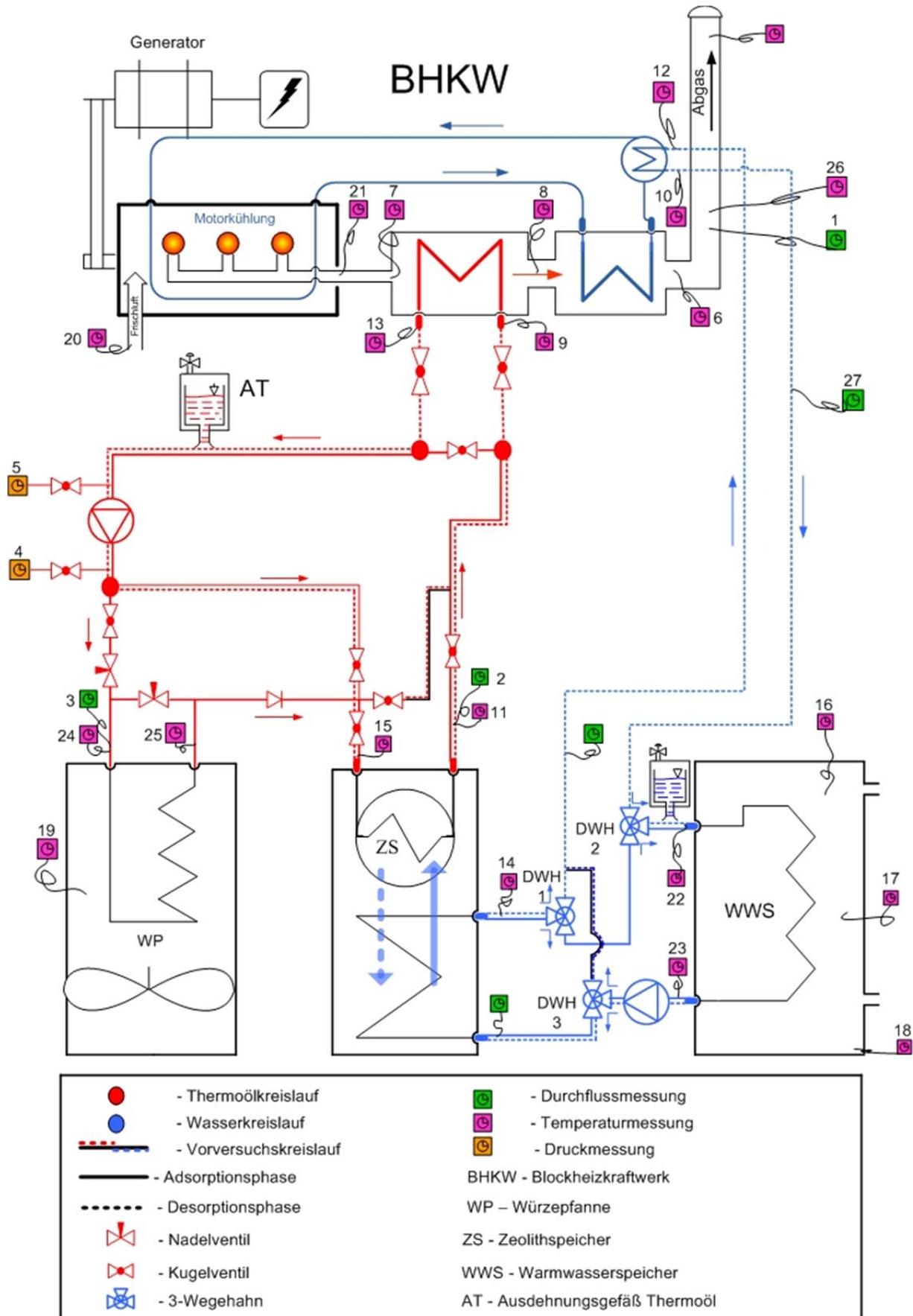


Abbildung 18 Schematischer Versuchsaufbau mit eingesetzter Messtechnik

3.2.5 Ergebnisse der Messungen

In Abbildung 19 ist der Temperaturverlauf der Desorptionsphase dargestellt. Bei diesem Versuch wurde ein Ölmassenstrom von 550 kg/h eingestellt und der Heißluftmassenstrom betrug 35,5 kg/h.

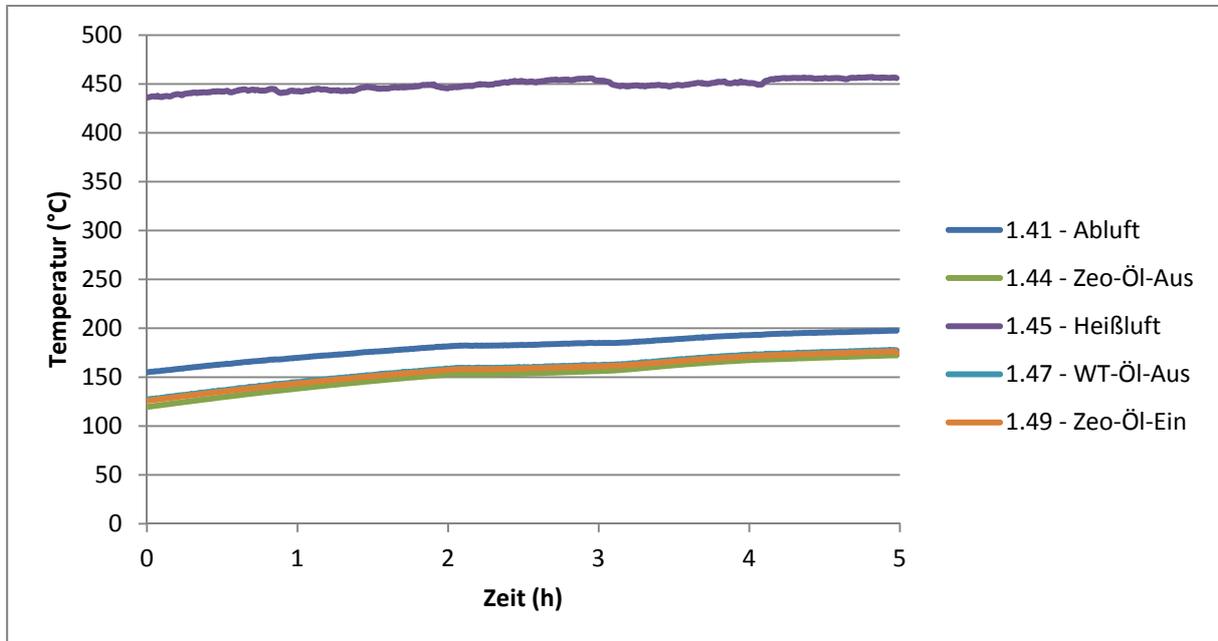


Abbildung 19 Desorptionsvorgang in der Verbundanlage

Nach einer Desorptionsphase von fünf Stunden wurde die Versuchsanlage auf Adsorption umgeschaltet, wobei die Würzepfanne in weniger als einer Stunde auf Siedetemperatur aufgeheizt wurde, wie Abbildung 20 zeigt.

In weiteren Versuchsreihen wurden die Hauptparameter identifiziert, um die Versuchsanlage so effizient wie möglich zu betreiben.

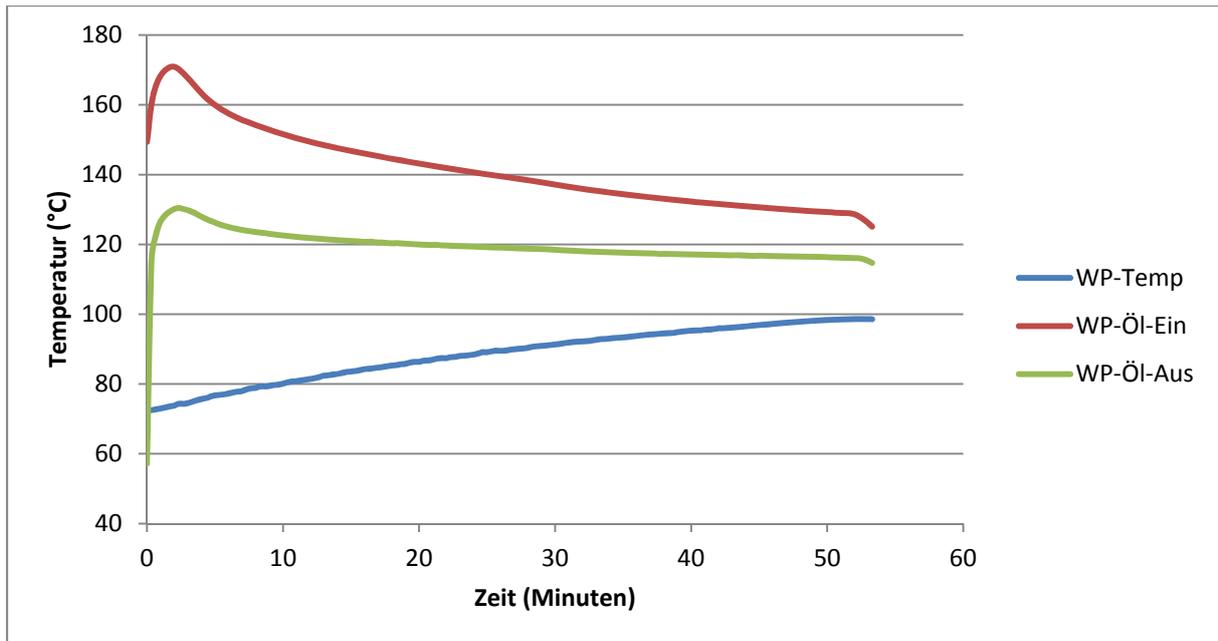
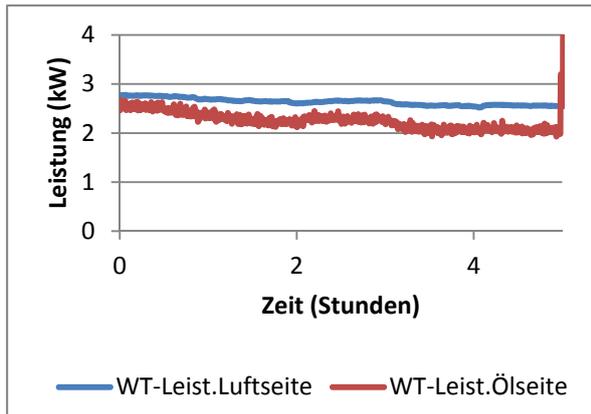


Abbildung 20 Würzpfanne Aufheizvorgang in der Verbundanlage

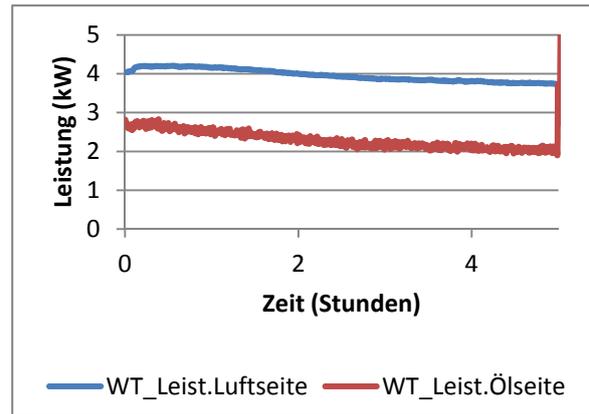
In Abbildung 21 ist die Effizienz des Rauchgaswärmeübertragers dargestellt. Bei einem Luftmassenstrom von 35,5 kg/h und einem Ölmassenstrom von 550 kg/h erreicht der Wärmetauscher seine maximale Effizienz von 85 %.

Versuche, mehr thermische Energie in den Wärmetauscher einzubringen, zeigen, dass der Luftmassenstrom um 50 % erhöht werden kann, aber sich dadurch die Effizienz des Wärmetauschers deutlich verschlechtert. Auf der Ölseite wurde kaum eine Erhöhung der Energiezunahme erkennbar (siehe Abbildung 21 a) und b)). Warum solche Wärmeverluste auftreten, ist leider aus den Versuchen nicht vollkommen erklärbar. Ein Grund dafür kann die Konstruktion des Wärmeübertragers sein. Weil der Dieselmotor ziemlich viel Ruß ausstößt, wurde am Anfang der Wärmeübertrager so ausgelegt, dass dieser relativ leicht zu reinigen ist. Der Ruß verschlechtert nicht nur den Wärmeübergang, er kann auch die Rohre des Rohrbündels verstopfen (siehe Abbildung 15). Daher wurden bei der Konstruktion des Wärmeübertragers glatte Rohre verwendet, anstatt den Wärmeübertrager mit Strömungsrippen auszustatten.

Ein anderer Grund für schlechte Wärmeübertragung kann auch die Positionierung des Wärmeübertragers sein. Wegen Platzmangels wurde er waagrecht verbaut, was zu nicht idealen Bedingungen seitens der Ölströmung geführt haben könnte, obwohl der Wärmeübertrager auf der Ölseite mit zwei Wirbelplatten versehen ist. Auch die niedrigen Werte der Wärmekapazitäten des Öls und der Luft beeinflussen die Effizienz des Wärmeübertragers negativ. In bestimmten Betriebszuständen arbeitet der Wärmeübertrager einwandfrei.



a)

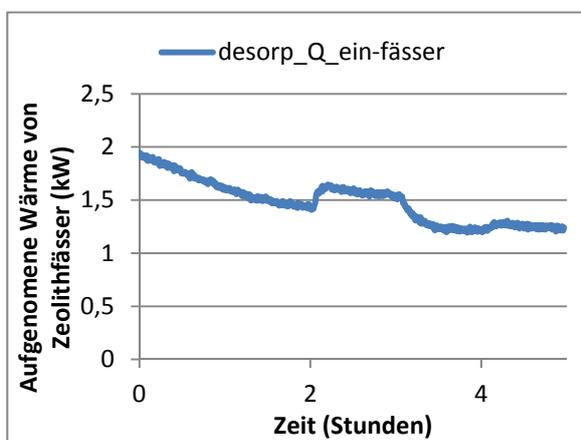


b)

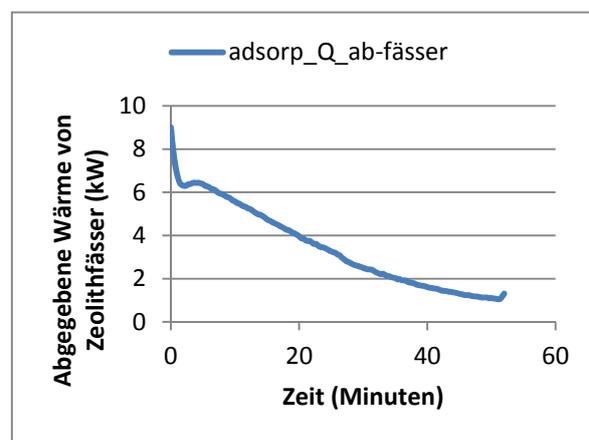
Abbildung 21 Wärmetauscher Effizienz bei veränderlichem Luftmassenstrom

Für die energetische Bilanzierung wurden die thermischen Energien betrachtet, die in dem Wärmetauscher über die Heißluftgebläse eingebracht wurden und die in der Form von Warmwasser von BHKW zum Warmwasserspeicher und zum Verdampfer der Zeolithwärmespeicherfässer gelangt sind.

Der Zeolithwärmespeicher hat in knapp einer Stunde 3,45 kW abgegeben und hat innerhalb von fünf Stunden 7,41 kW aufgenommen. Damit erreicht er eine Effizienz von 46,5 %. Die grafische Darstellung ist in Abbildung 22 zu sehen.



a) Aufladung des Wärmespeichers



b) Entladung des Wärmespeichers

Abbildung 22 Aufladung und Entladung des Wärmespeichers

Die theoretische notwendige thermische Energie, die die Würzepfanne braucht um von 70 °C auf Siedetemperatur aufgeheizt zu werden beträgt 6,2 kWh. Gemessen wurde eine Energiezunahme von 6,6 kWh. In Abbildung 23 ist gut erkennbar, wie die gesamte notwendige Energie für die Aufheizung der Würzepfanne sich aus den abgegebenen thermischen Energien von Wärmespeicher und von Wärmetauscher addiert.

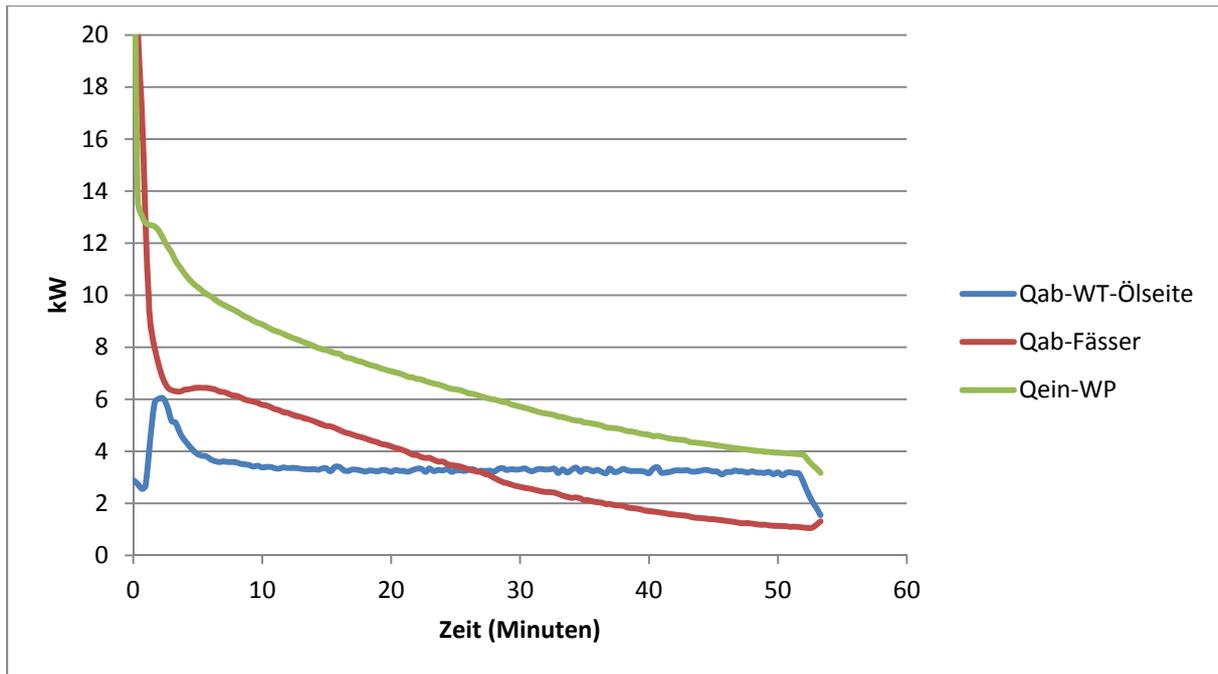


Abbildung 23 Graphische Darstellung der Energiezunahme in der Würzefanne

3.3 Grundlegende Auslegungsdaten der Modellbrauerei mit Verfahrenskombination BHKW, Zeolithspeicher und SchoKo

Die im Rahmen dieses Projektes untersuchte Verfahrenskombination aus BHKW, Zeolithspeicher zur Wärmeversorgung eines Sudhauses mit SchoKo wurde experimentellen Tests unterzogen, in denen die grundsätzliche Funktionalität nachgewiesen werden konnte. Siehe Abschnitt 3.1 und 3.2. Die Anlagenkomponenten wurden daraufhin für das Modell auf eine Sudhausgröße von 100 hl Ausschlagmenge hochskaliert, wobei die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen im Labormaßstab in die Auslegung der Modellbrauerei eingingen. Die Wärmeversorgung der Modellbrauerei erfolgt durch ein mit Biogas betriebenes BHKW-Modul vom Typ et 140 EG – MAN, dessen Nennwärmeleistung entsprechend der Sudhausgröße ausgewählt wurde.

Den zeitlichen Ablauf der Prozessschritte im Sudhaus zeigt Abbildung 24. Eingetragen sind die Komponenten Maische- und Würzefanne (MWP), Läuterbottich (LBo), Whirlpool (WHP) und Plattenkühler (PLK), sowie die Be- und Entladezeiten des Zeolithspeichers.

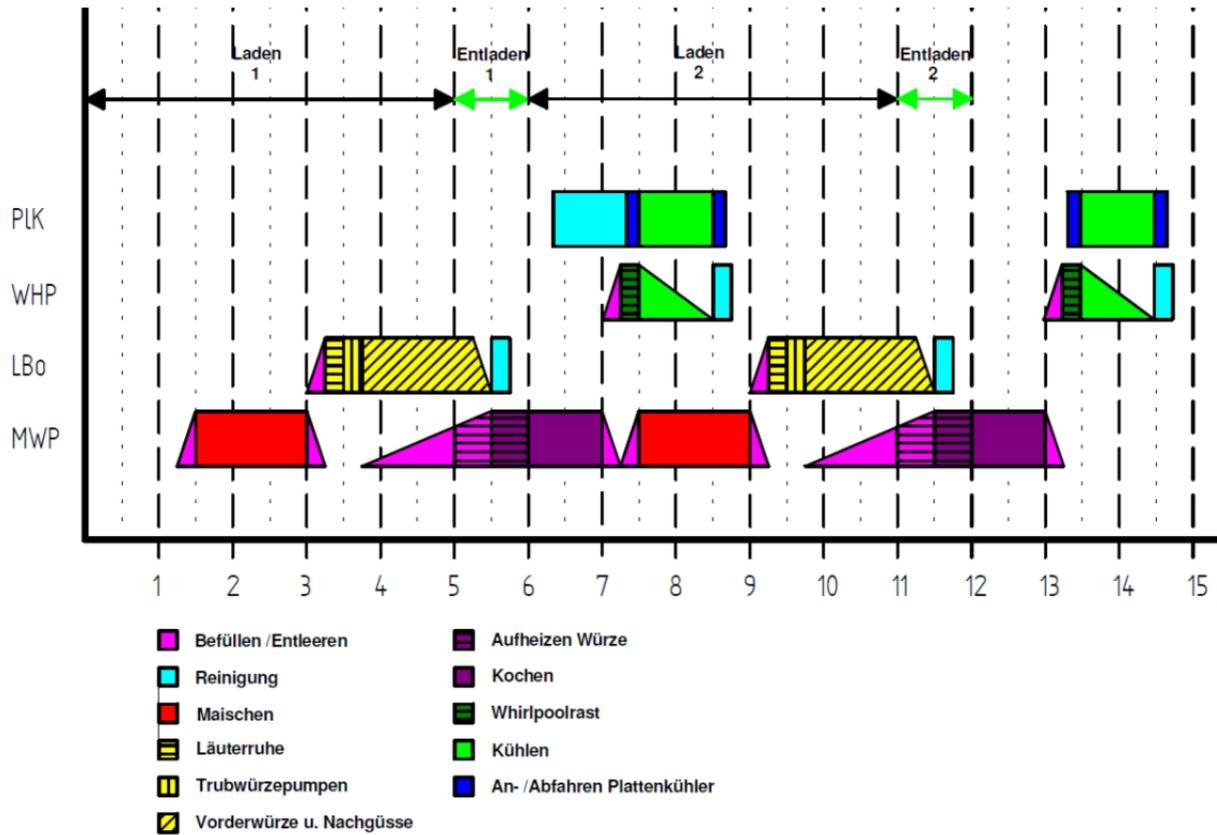


Abbildung 24 Belegungsdiagramm des Sudhauses

Zusätzlich zu BHKW und Zeolithspeicher werden zur Prozesswärmeversorgung ein Warmwasserspeicher und ein Brauchwasservorratsbehälter sowie als Backup ein Spitzenlastkessel benötigt. Die Anlagenverschaltung der Modellbrauerei zeigt Abbildung 25.

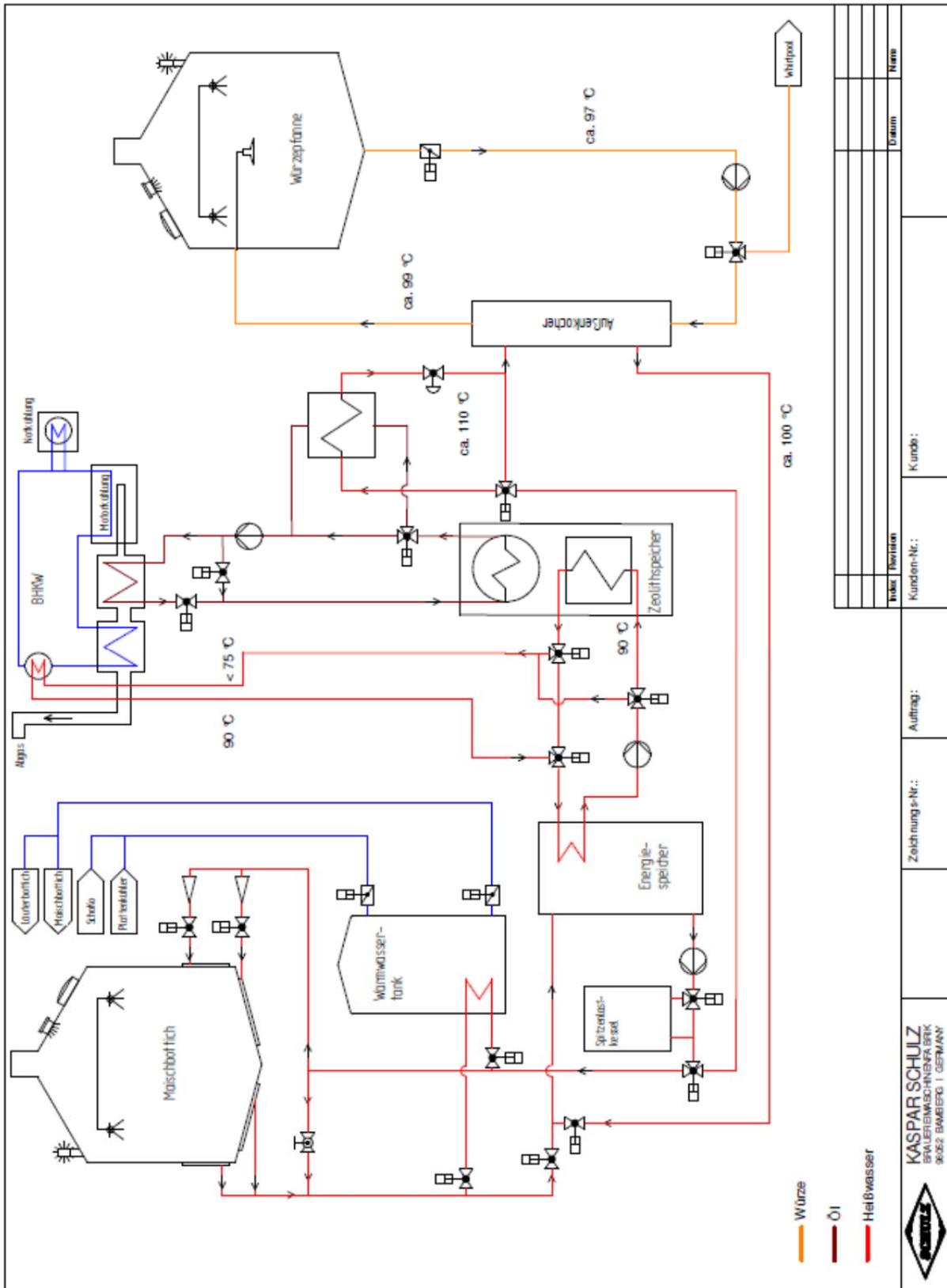


Abbildung 25 Fließschema der Gesamtanlage

Die sich aus der in Abschnitt 3.4 beschriebenen Modellierung ergebenden Dimensionen der für Sudhaus und Flaschenkeller ausgelegten Komponenten enthält

Tabelle 3. Für eine Tagesproduktion von 200 hl Bier werden in der Tabelle die Nennleistung von BHKW; Kessel, Zeolithspeicher und Flaschenwaschmaschine im Aufheizvorgang und Betrieb mitsamt der täglichen Laufzeit in Stunden angegeben. Für die Sudhausprozesse Maischen, Läutern und Würzekochen werden jeweils der tägliche Wärmebedarf angegeben. Zudem ist die täglich rückgewinnbare Wärme in Schonkocher und Plattenkühler vermerkt, sowie die notwendigen Kapazitäten der Warmwasserspeicher.

Tabelle 3 Dimensionen der Komponenten, Sudhaus mit 100 hl

Komponente	Nennleistung in kW	Temperatur in °C	Laufzeit in h/Tag
BHKW	$P_{el} = 140$ kW $P_{th,HT} = 79$ kW $P_{th,NT} = 128$ kW	120 – 250 90	13,5
Heisswasserkessel	$P_{th,HT} = 56$ kW	120	6
Zeolithspeicher	$P_{Des} = 50$ kW $P_{Ads} = 201$ kW	120 – 250 250 - 120	10 2
Flaschenwaschmaschine	$P_{Heiz} = 126$ kW $P_{Betr.} = 109$ kW	60 - 85 85	2 4,25
	Wärmebedarf in kWh/Tag		
Maischbottich	920	50 - 78	3
Läuterbottich	924	78	4,5
Würzefanne aufheizen	560	74 – 99	2
Würze heißhalten	129	99	2
	Rückgewinnbare Wärmemenge in kWh/Tag		
Schonkocher	290	99 - 80	0,5
Plattenkühler	430	80 - 60	1
	Wärmespeicherkapazität in kWh		
Niedertemperaturwärmespeicher	210	90	15,25
Warmwasserbehälter	363	50-78	8,5

3.4 Modellierung und energetische Bilanzierung der Modellbrauerei im Vergleich mit konventioneller Brauerei

Die innovative Verfahrenskombination dieses Projekts unterscheidet sich vom Wärmehaushalt einer konventionellen Brauerei ausschließlich im Sudhaus. Daher wurde für den Vergleich mit konventionellen Systemen hauptsächlich das Sudhaus betrachtet. Zusätzlich wurde lediglich der Wärmebedarf des Flaschenkellers hinzugezogen, da dieser in Konkurrenz zum Wärmebedarf des Sudhauses steht und demnach die Wärmeversorgung einer Brauerei entscheidend mit beeinflusst.

Für die Abbildung der Modellbrauerei wurden alle Wärmeströme im Sudhaus zeitlich in Viertelstunden aufgelöst. Neben den Wärmeverbrauchern wie z.B. das Maischen, Läutern und Würzekochen wurden ebenso die Wärmeversorgungseinheiten BHKW und Heißwasser-Spitzenlastkessel sowie die Wärmespeicher Zeolithspeicher für Hochtemperatur und Warmwasserspeicher für Niedertemperatur sowie einen Warmwasserbehälter modelliert. Angebot und Bedarf wurden aufeinander abgestimmt, wobei die Wärmeversorgungseinheiten und Wärmespeicher möglichst klein dimensioniert wurden.

Modellerstellung

Die Betriebsdaten des BHKW-Moduls vom Typ et 140 EG-MAN wurden dem Datenblatt entnommen. Die Verbrauchszahlen der Flaschenwaschmaschine bilden reale Betriebsdaten ab, die der Firma Kaspar-Schulz von Projektpartnern genannt wurden. Basierend auf den vorgegebenen Prozessdaten, wie Sudgröße und den Prozesstemperaturen wurden durch einschlägige thermodynamische und verfahrenstechnische Rechenwege die Dimensionierung und die Wärmebedarfe aller anderen Komponenten ermittelt. Bei der Abbildung des Zeolithwärmespeichers wurden die Erkenntnisse aus den Messungen des Speicherprüfstands berücksichtigt. Weiterhin wurden Wärmeverluste über Nacht bei den Speichern und dem Warmwasserbehälter mit einbezogen. Die Berechnungen wurden in Excel implementiert und die Exceldarstellung der Modellierung ist Anhang 6.1 hinzugefügt.

Wie der Verschaltung aus Abbildung 25 zu entnehmen ist, wird mit der Kühlwasserabwärme des Blockheizkraftwerks zunächst der Warmwasserspeicher beschickt. Dem nachgeschaltet sind die Wärmeverbraucher sowie der Wasservorratsbehälter angeordnet. Der Niedertemperaturwärmekreislauf des Zeolithspeichers ist ebenfalls mit dem Warmwasserspeicher verbunden, wodurch die Kondensationsabwärme des Hochtemperaturspeichervorgangs eingespeichert werden kann und während der Aufheizphase der Würze die im Zeolithspeicher benötigte Verdampfungswärme bereitgestellt wird.

Der Abgaswärmeübertrager des BHKWs ist mit dem Adsorber verbunden, um die benötigte Desorptionswärme einzubringen. Während des Kochvorgangs der Würze ist dieser Hoch-

temperaturkreislauf wiederum über einen Wärmeübertrager mit dem Außenkocher der Würzpfanne verbunden, um hier die hohe Wärmeleistung für das Aufheizen und Heißhalten bereitzustellen. Da das BHKW durchläuft und der Zeolithspeicher zwischen Einspeichern (Desorption) und Ausspeichern (Adsorption) wechselt, wird der Abgaswärmestrom sowohl zur Beladung des Speichers als auch zur Unterstützung der nutzbaren Speicherwärme für den Kochvorgang genutzt. Wenn der nutzbare Wärmestrom des Abgases den Hochtemperaturbedarf des Prozesses übersteigt, wird die überschüssige Wärme dem Niedertemperaturkreislauf zugeführt. Die geschieht durch den zweiten Abgaswärmetauscher im BHKW, der dafür sorgt, dass das Abgas immer auf 120 °C abgekühlt wird und keine Wärme verloren geht.

Zusätzlich zur Wärmeerzeugung durch das BHKW wird in der Modellbrauerei ein Spitzenlastkessel vorgesehen, der kurzfristig Wärmebedarfe decken kann und als Backup bereitsteht, falls eine andere Wärmeversorgungs-komponente ausfällt.

Der Brauprozess mit der betrachteten Verfahrenskombination bietet zwei Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung: über den Plattenkühler und den Schonkocher. In beiden Fällen wird Heißwasser bereitgestellt, das dem Warmwasservorratsbehälter zugeführt wird.

Die Flaschenwaschmaschine wurde auf Basis der täglichen Bierproduktion und unter der Annahme von 100 % Flaschenabfüllung ausgelegt. Die Daten für eine 7 000 Flaschen pro Stunde reinigende Anlage wurden von Kaspar-Schulz bereitgestellt.

Während der Modellerstellung wurde zur Verbesserung der Auslegung und insbesondere zur Reduzierung der Anlagengrößen die Verschaltung der Wärmespeicher variiert. Unter anderem wurden zwischendurch Aufheizphasen des Warmwasserbehälters vorgesehen, um die Bereitstellung der Wärme für das Einmischen und Läutern trotz hohem Wärmebedarfs durch die niedrige Leistung des BHKW-Kühlwassers bewerkstelligen zu können. Der Zeitpunkt des Betriebs der Flaschenwaschmaschine wurde in der Modellierung ebenfalls variiert und schlussendlich in die späteren Arbeitsstunden des Tages verschoben. Auf diese Art und Weise wurden günstige Betriebsabläufe für die Wärmeversorgung des Sudhauses und des Flaschenkellers herausgearbeitet.

3.4.1 Ergebnisse der Modellierung

Für Sudhaus und Flaschenwaschmaschine der Modellbrauerei ergibt sich ein täglicher Wärmeverbrauch von 3 122 kWh, der durch das BHKW mit 207 kW thermischer Leistung und einen Spitzenlastkessel mit 56 kW gedeckt wird. Dabei produziert das BHKW weitere 1 890 kWh Strom, die dem Prozess zur Verfügung stehen oder verkauft werden können.

Der Wärmeverbrauch wurde in der Modellierung aufgeteilt in Niedertemperaturwärme bei Temperaturen unter 90 °C und Hochtemperaturwärme bei Temperaturen über 90 °C.

Hochtemperaturwärme wird im Sudhaus ausschließlich beim Würzekochen benötigt, siehe Abbildung 26. Die Wärme vom BHKW Abgas wird kontinuierlich über 13,5 Stunden pro Tag abgegeben (= 1066 kWh), also bei möglichst hoher Laufzeit bei niedriger Anlagengröße. Mittels der Abgaswärme des BHKWs wird der Zeolithspeicher geladen und dabei bis auf eine Temperatur von 250 °C aufgeheizt. Sobald die Würze nach dem Läutern in die Würzepfanne überführt wird, beginnt die Aufheizung von 74 auf 99 °C. Hierzu wird die Abgaswärme aus dem BHKW gemeinsam mit der Adsorptionswärme aus dem Zeolithspeicher genutzt.

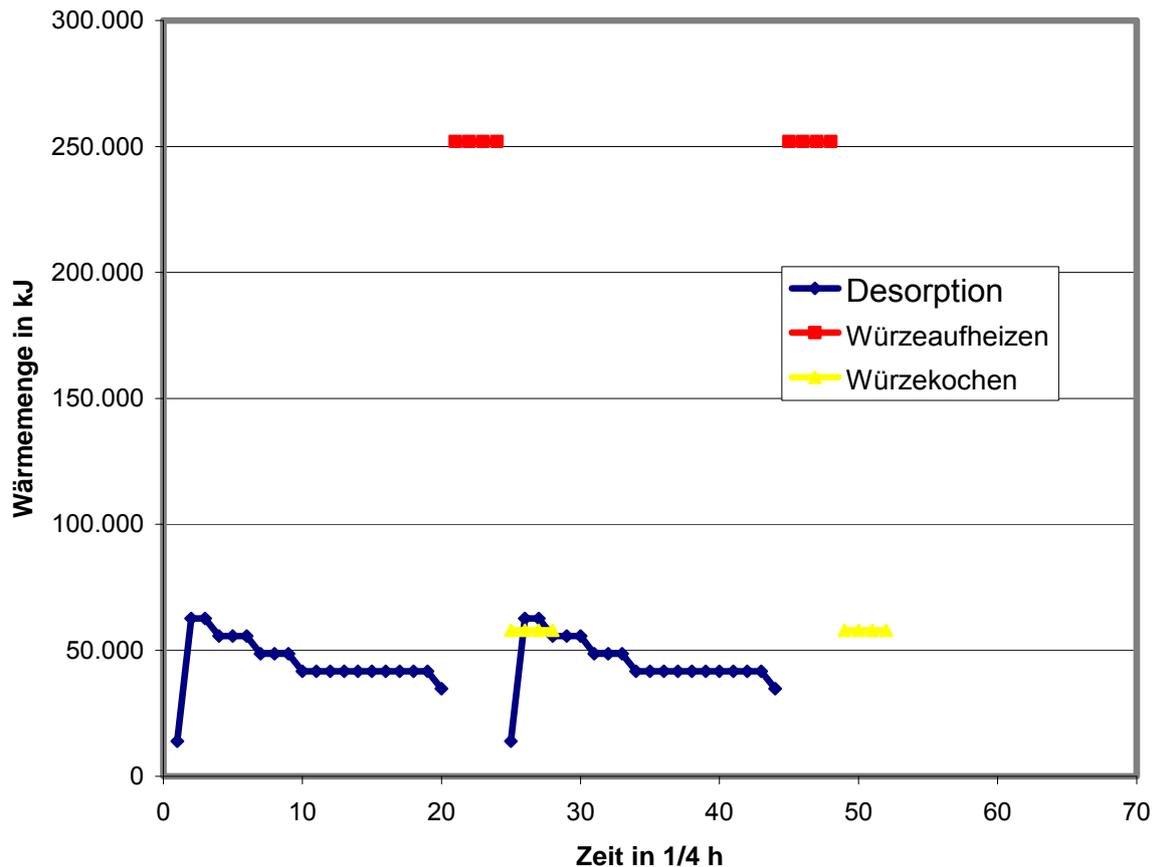


Abbildung 26 Hochtemperaturwärmebedarf der Modellbrauerei (Temperaturniveau > 90 °C)

Die Kondensationstemperatur des Zeolithspeichers wurde für die Modellierung zu 60 °C angenommen, da aus den Messungen der Prototypenanlage in Aachen so der beste Speicherwirkungsgrad der Hochtemperatur zu 78 % ermittelt wurde. Dieses Ergebnis floss in die Modellierung ein, so dass 78 % der zur Desorption aufgewendeten Wärme bei der Adsorption wieder freigesetzt und nutzbar gemacht werden. Die Kondensationsabwärme des Speichers wurde in der Modellierung der Einfachheit halber nicht für eine Nutzung berücksichtigt, sie kann aber im realen Prozess für die Bereitstellung des Maischwassers oder ähnliches genutzt werden.

Der Zeolithspeicher für das 100 hl Sudhaus beinhaltet 1 t Zeolith, dessen Volumen bei einer Schüttdichte von 640 kg/m³ ca. 1,56 m³ beträgt. Somit ergibt sich für den Speicher inklusive aller Wärmetauscher und Isolierung ein maximales Volumen von ca. 2 m³. Während der Ad-

sorption werden aus dem Speicher 201 kWh Wärme bei 110 °C freigesetzt. Daraus resultiert eine volumetrische Speicherdichte des Zeoliths von ca. 129 kWh/m³. Während der Desorption müssen demnach 251 kWh vom Abgaswärmetauscher in den Zeolithspeicher übertragen werden. Somit nutzt der Speicher circa die Hälfte der Abgaswärme und die restlichen 564 kWh stehen dem Niedertemperaturwärmekreislauf zur Verfügung.

Abbildung 27 kann entnommen werden, wann der Spitzenlastkessel anspringt, um den Wärmebedarf insbesondere des Flaschenkellers zu decken. Der Kessel stellt somit pro Tag 327 kWh Wärme zur Verfügung, bei einer Laufzeit von 6 h.

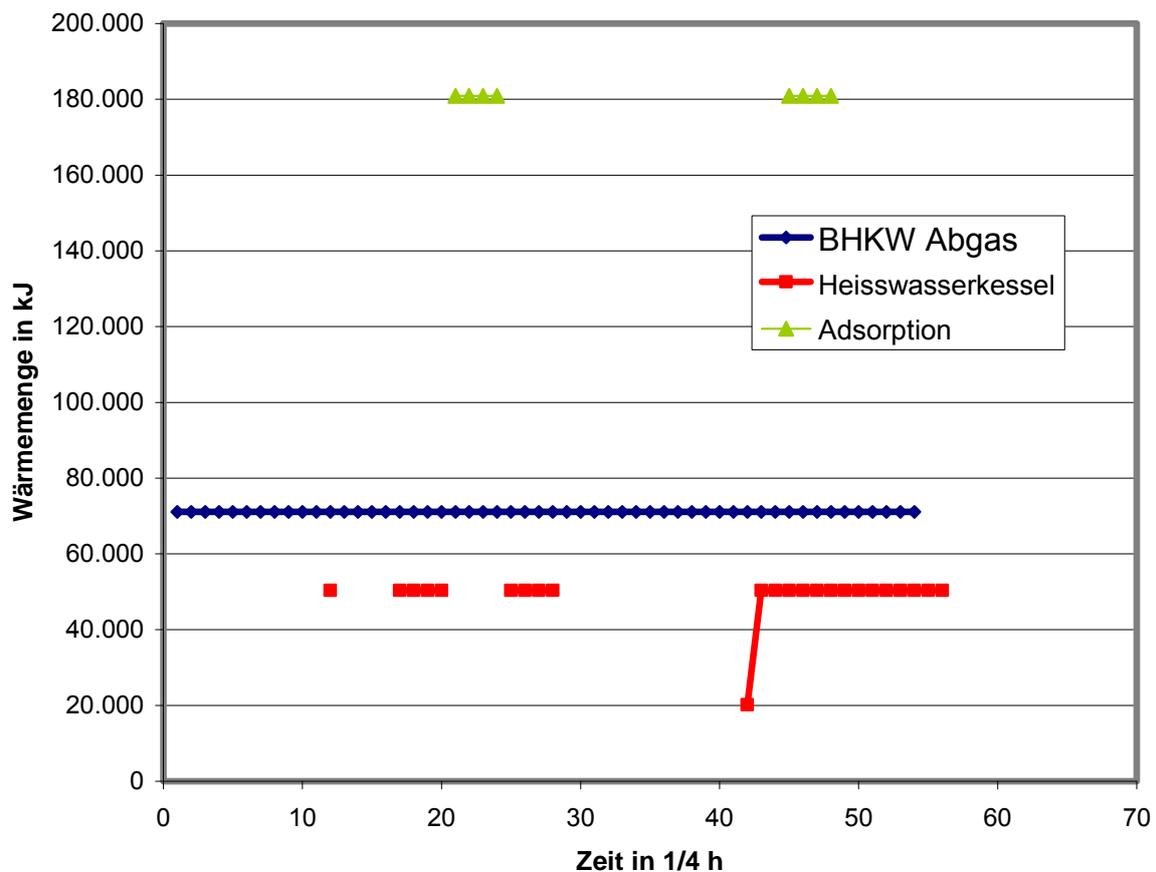


Abbildung 27 Hochtemperaturwärmeangebot der Modellbrauerei (Temperaturniveau > 90 °C)

Der Niedertemperaturwärmebedarf des Sudhauses und des Flaschenkellers ist wesentlich komplexer als der Hochtemperaturwärmebedarf. Abbildung 29 zeigt das Ergebnis der Modellierung für das Wärmeangebot und Abbildung 28 zeigt den Wärmebedarf im Niedertemperaturbereich. Der einzig kontinuierliche Verbraucher ist die Flaschenwaschmaschine, siehe Abbildung 28. Mit 36 000 Flaschen pro Tag und einer Laufzeit von 2 Stunden Aufheizen plus 5,25 Stunden Betrieb verbraucht der Flaschenkeller 812 kWh Wärme am Tag. Die Wärmebedarfe der Sudhausprozesse Maischen und Läutern kann Tabelle 3 entnommen werden. Der Verdampfer benötigt 91 kWh bei 90 °C. Bereitgestellt werden diese Wärmeströme vom BHKW Kühlwasserwärmetauscher, der eine Wärmemenge von 1728 kWh be-

reitstellt, sowie dem Spitzenlastkessel und durch die Abgaswärme, die nicht in den Zeolithspeicher abgeführt wird.

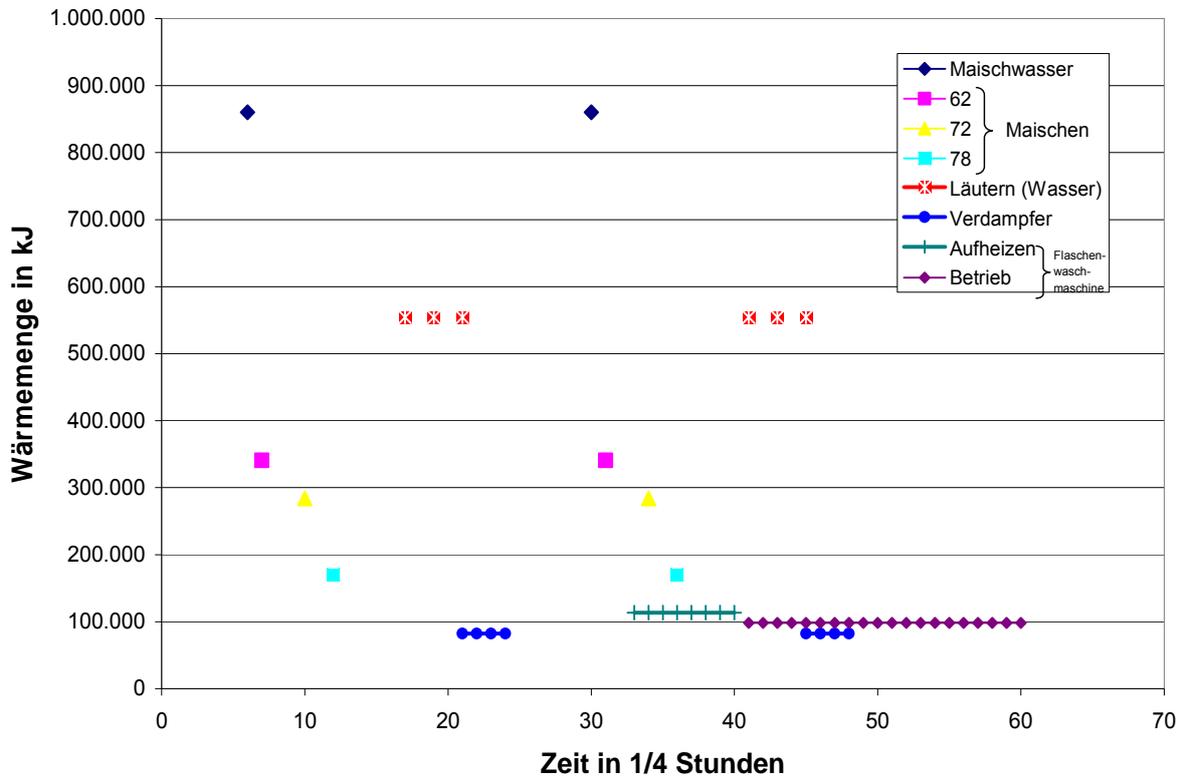


Abbildung 28 Niedertemperaturwärmebedarf der Modellbrauerei (Temperaturniveau < 90 °C)

Wie bereits vorher beschrieben, wird der Warmwasserspeicher durch die Wärmeerzeuger über den Niedertemperaturkreislaufs gespeist. Für den Warmwasserspeicher genügt eine Größe von 74 hl, wodurch sich eine maximal speicherbare Wärmemenge von ca. 210 kWh bei 25 K Temperaturdifferenz ergeben. Im Warmwasserbehälter wird das Wasser zum Einmaischen und Läutern vorgehalten, es ergibt sich ebenfalls eine gespeicherte Wärmemenge. Der Behälter wird von Überschusswärme aus dem Prozess sowie der Wärmerückgewinnung durch Plattenkühler und SchoKo gespeist. Die Speicherfüllstände sind in Abbildung 29 gezeigt.

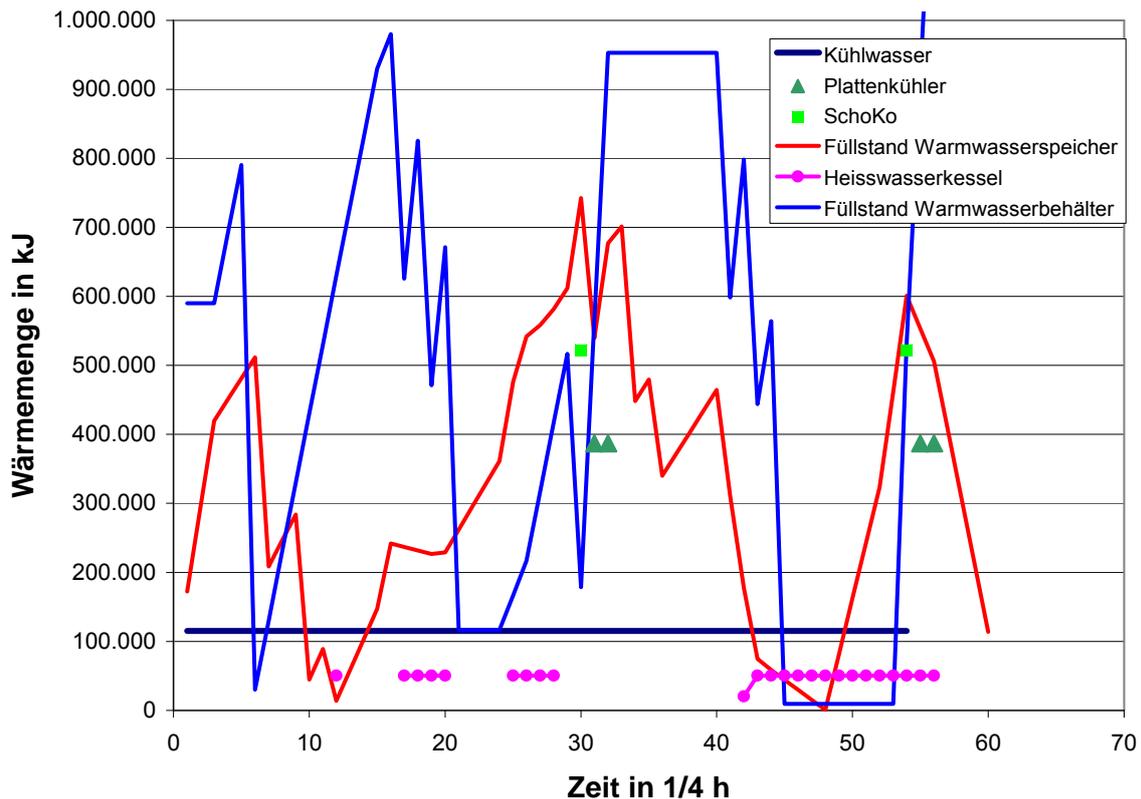


Abbildung 29 Niedertemperaturwärmeangebot und Speicherstände der Modellbrauerei (Temperaturniveau < 90 °C)

Bewertung der Speicherkapazität des Zeolithwärmespeichers

Die Speicherdichte ist ein Maß für den Platzbedarf des Adsorptionswärmespeichers, der wiederum, vor allem bei bestehenden Gebäuden, für die Einbringung und räumliche Einbindung der Speicher bedeutend ist. Die Werte der Speicherdichte liegen höher, als beispielsweise für Wärmespeicher, die bei Hochdruck Warmwasser speichern können.

Für eine vergleichende Bewertung soll die volumetrische Speicherkapazität der unterschiedlichen Speichermedien herangezogen werden. Wie in Kapitel 3.4.1 näher erläutert, ergab sich anhand der im Verlauf des Projekts gesammelten Erfahrungen und Erkenntnisse für das Fallbeispiel der 100 hl Brauerei eine Zeolithmenge von einer Tonne, um die bereitzustellende Wärmemenge von 201 kWh zu liefern. Daraus resultiert ein Volumen des Zeoliths von ca. 1,56 m³ und eine volumetrische Speicherdichte des Zeoliths von 129 kWh/m³. Zieht man einen Heißwasserdruckspeicher zum Vergleich heran, der mit einem maximalen Druck von 6 bar arbeitet, so ergibt sich eine maximale Speichertemperatur von 160 °C. Bei einer minimalen Rücklauf­temperatur von 110 °C beträgt die Spreizung 50 K. Daraus resultiert eine volumetrische Speicherkapazität von ca. 58 kWh/m³. Um die zuvor angesprochene Wärmemenge des 100 hl Sudhauses bereitzustellen, ist ein Volumen von ca. 3,46 m³ Heißwasser nötig. Somit erlaubt der Zeolithspeicher eine Reduktion des Speichervolumens um einen Faktor 2,2. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass dieser Wert nur das Volumen der Spei-

chermedien berücksichtigt. Die Peripherie des Zeolithspeichers erfordert durch die zusätzlichen Wärmeübertrager mehr Platz. Jedoch bedarf auch der Heißwasserspeicher zusätzlichen Platz für Wärmeübertrager und Behälter. Eine Anfrage bei einem Hersteller von Ruthspeichern für einen Speicher (Medium Wasser, Beladetemperatur 160 °C, Entladetemperatur 110 °C, 200 kWh) ergab ein Volumen von 5,5 m³ für den Speicherbehälter und zusätzlich einen weiteren Wärmeübertrager. Daher ist eine signifikante Einsparung des Platzbedarfs durch den Zeolithspeicher zu erwarten. Zudem sei anzumerken, dass ein Heißwasser-Druckspeicher bei den zuvor veranschlagten Drücken und Temperaturen der Betriebssicherheitsverordnung für Druckbehälter und Dampfkessel unterliegt (DGRL: Kat IV). Mit dieser sind die entsprechenden Auflagen und Zertifikate verknüpft. Die Betriebssicherheitsverordnung schreibt außerdem eine wiederkehrende äußere als auch innere Prüfung und Festigkeitsprüfung von der zugelassenen Überwachungsstelle vor, was wiederum zu den damit verbundenen zusätzlichen laufenden Kosten führt.

Vergleich mit konventioneller Brauerei

Der konventionelle Brauprozess wurde, analog zur Modellbrauerei, viertelstündlich aufgelöst in Excel abgebildet. Das konventionelle Sudhaus ohne SchoKo und ohne Wärmespeicher sowie die Flaschenwaschmaschine werden hierbei durch einen Heißwasserkessel beschickt. Wärmerückgewinnung durch einen Plattenkühler inklusive Warmwasserbehälter sind berücksichtigt. Wärmeverluste wurden für den konventionellen Prozess vernachlässigt. Die Flaschenwaschmaschine wird analog zur Modellbrauerei abgebildet.

Der zur Versorgung des konventionellen Sudhauses plus Flaschenkeller benötigte Kessel hat eine Leistung von 960 kW bei 11 h Laufzeit pro Tag. Werden 208 Arbeitstage pro Jahr angenommen, so ergeben sich Laufzeiten der Energieerzeugungsanlagen von 2288 h für den Kessel der konventionellen Brauerei, im Vergleich zu 2704 h für das BHKW der Modellbrauerei. Die Modellierungsergebnisse werden in den folgenden Abschnitten bezüglich der Energieeinsparung und Wirtschaftlichkeit bewertet.

3.4.2 Energie und CO₂-Einsparungspotential

Der spezifische Wärmebedarf von Brauereien unter 500.000 hl/a Ausstoß liegt um 20 bis 40 % höher als in Großbrauereien. Deren Effizienz ist aber auf die Reduktion des Wärmebedarfs durch kontinuierlichere Anlagennutzung zurückzuführen und damit für kleinere Brauereien kaum zu erreichen. Deshalb müssen die Energieeffizienzsteigerung und damit die CO₂-Reduktion kleinerer Brauereien durch effizientere Wärme- und Stromgestehung zustande kommen. Wie schon im Antrag ausgeführt, liegt ein Reduktionspotential in der Vermeidung von 24 h, 7 d pro Woche betriebenen Dampfkessel und in der kombinierten Wärme- und Strombereitstellung.

Bei den nachfolgenden Berechnungen (Kap. 2.4.2 und Kap. 2.5) wird die Primärenergieeinsparung nur auf die für den Brauereibetrieb notwendige Wärmemenge und den bei Betrieb des BHKWs bereitgestellten Strom bezogen. Der Strombedarf der Modellbrauerei ist höher als der vom BHKW bereitgestellte Strom. Diese zusätzliche Strommenge muss aber nicht berücksichtigt werden, da sie sich durch die Umstellung in der Wärmebereitstellung nicht ändert, und somit keinen Einfluss auf die Primärenergieeinsparung oder die CO₂-Reduktion durch das innovative Wärmebereitstellungskonzept hat.

Die Simulationsergebnisse ergeben für die Modellierung der konventionellen Brauerei einen Gesamtnettowärmebedarf von 61 149,60 kJ/hl. Bei einem Kesselwirkungsgrad von 0,9 bedeutet das einen Brennstoffbedarf (Erdgas) von 67 944,60 kJ/hl. Dazu kommt bei konventioneller Strombereitstellung ein weiterer Brennstoffbedarf von 81 000 kJ/hl (Wirkungsgrad 0,42). Der Gesamtprimärenergiebedarf liegt damit bei 148 944,60 kJ/hl; gerechnet mit einem CO₂-Emissionsfaktor von 0,056 t/GJ ergibt sich ein CO₂-Ausstoß von 0,834 t/hl.

Eine mit einem BHKW und Zeolithspeicher ausgerüstete SchoKo-Brauerei deckt den Wärmegrundbedarf über das BHKW ab (50 301 kJ/hl), dabei werden gleichzeitig 34 020 kJ/hl Strom bereitgestellt. Bei einem Gesamtwirkungsgrad BHKW von 0,83 werden dazu 95 356 kJ/hl in Form von Erdgas benötigt. Zusätzlich werden durch einen Spitzenlastkessel 5 896 kJ/hl bereitgestellt. Dies entspricht wiederum 6 552 kJ/hl in Form von Erdgas. Der Gesamtprimärenergiebedarf (101 808 kJ/hl) entspricht einem CO₂-Ausstoß von 0,57 t/hl.

Die gesamte Primärenergieeinsparung der innovativen Kombination aus BHKW, Zeolithwärmespeicher und SchoKo-Brauerei im Vergleich mit einer konventionellen Brauerei summiert sich zu 47 136,6 kJ/hl. Davon sind 18 033,5 kJ/hl (38%) auf den Einsatz des SchoKo zurückzuführen, da dieser eine Senkung der Kochtemperatur sowie Wärmerückgewinnung, und somit eine Reduktion des Nettowärmebedarfs, ermöglicht [6]. Die weitere Energieeinsparung von 29 103,1 kJ/hl basiert auf der erhöhten Energieeffizienz des BHKWs, die erst durch Einsatz der Wärmespeicher nutzbar ist. Die erreichte Energieeinsparung ließe sich durch eine verbesserte Wärmedämmung der Speicher, wie zuvor diskutiert, noch weiter steigern.

Bei einer angenommenen Jahresproduktion von 41 600 hl entspricht die Primärenergieeinsparung einer CO₂-Gesamtreduktion von knapp 11 000 t CO₂ pro Jahr, 31,6 % entsprechend. Nicht berücksichtigt wird in diesem Szenario, dass bei der Verfahrenskombination BHKW/Zeolith Biogas als Brennstoff eingesetzt werden soll. Dadurch ergibt sich ein weiteres CO₂-Einsparpotential. Dieses lässt sich aber nicht vereinfacht abschätzen, weil durch das Verfahren nur der Biogasverbrauch an anderer Stelle ersetzt wird und dessen CO₂-Einsparpotential wiederum von den dortigen Gegebenheiten der Wärmenutzung abhängig ist.

3.5 Betriebswirtschaftliche Betrachtung

Brauereien mit einer Jahresproduktion von ca. 40 000 hl/a sind kleine mittelständische Brauereien. Sie unterliegen einem starken Wettbewerbsdruck. Auf der einen Seite stehen die Großbrauereien, welche die Preise durch die effizientere Großproduktion unterbieten können. Auf der anderen Seite stehen ähnlich strukturierte Konkurrenten, die sich durch Marketing, Regionalbezug und niedrigere Produktionskosten zu differenzieren suchen.

Die Energiekosten einer mittleren Brauerei betragen etwa 5 % der gesamten Produktionskosten. Das Energieeinsparpotential liegt maximal bei 2 % der Produktionskosten (wenn spez. Wärmebedarf einer optimalen Großbrauerei erreicht werden würde). Der dafür aufzuwendende Investitionsbedarf wird aber die Summe der Einsparungen bei weitem übertreffen.

Klassische BHKW-Konzepte sind aber nicht wirtschaftlich, weil keine ausreichend lange Laufzeiten für ein BHKW erreicht werden können und die Einspeisevergütungen relativ niedrig sind.

Ein Wettbewerbsvorteil für eine mittelständische Brauerei kann in einer Profilierung in Richtung Nutzung erneuerbarer Energien bestehen, d.h. die erneuerbaren Energien werden zu Marketingzwecken eingesetzt. Dass solche Konzepte erfolgreich sein können, zeigt das Beispiel der Privatbrauerei Hofmühl GmbH, Eichstätt, welche durch ihre Solarthermieanlage deutliche Umsatzsteigerungen erzielen konnte. Ein anders erfolgreiches Beispiel ist das Solarbier®-Label für Brauereien mit einem regenerativen Energieanteil von mehr als 25 %. Damit der Einsatz regenerativer Energien aber wirtschaftlich wird, bedarf es spezieller Energiekonzepte. Diese lassen sich in gewachsenen Betrieben selten (z.B. bei Austausch der Kesselanlage) verwirklichen, erfolgreiches Beispiel ist der Biomassekessel der Felsenbräu, Thalmannsfeld. Brauereineubauten bieten sich für die Einführung neuer Energiekonzepte unter Einbeziehung regenerativer Energien an, wie die Brauerei Rittmayer in Hallerndorf zeigt.

Alle nachfolgenden Berechnungen wurden als statische Berechnungen durchgeführt, weil dynamische Berechnungsmodelle auf Zinssätzen beruhen würden, die derzeit schwer einschätzbar sind und diese Berechnungen auch nur relativ grob sind, weil nur die Kosten der Hauptkomponenten berücksichtigt werden können. Installations-, Bau- und Leitungskosten sind sehr individuell und damit nicht abschätzbar. Außerdem sollten diese Baunebenkosten für eine konventionelle Energieversorgung sehr ähnlich sein.

In Folge der im Rahmen des Projekts gesammelten Erfahrungen und Erkenntnissen ist die Brauereimaschinenfabrik Kaspar Schulz in der Lage das Gefäß eines Zeolithspeichers, wie er für den Einsatz in Kombination mit einem Blockheizkraftwerk in einer Brauerei mit unterschiedlicher Betriebsgröße, oder weiteren industriellen Prozessen mit ähnlicher Wärmebedarfsstruktur, benötigt wird, auszulegen und zu fertigen. Der vakuumdichte Speicher ent-

hält den beschriebenen Adsorber und Verdampfer, besteht komplett aus Edelstahl und ist für die vorliegenden Medien und Temperaturen geeignet. Die Kosten des Zeolithspeichers wurden daher von Kaspar Schulz kalkuliert.

Basierend auf den Energiedaten der Simulation und folgenden Randdaten wurde der Wärmegestehungspreis und der ROI (Return on Investment) kalkuliert:

<u>Anlagenkosten BHKW/Zeolithspeicher</u>	
BHKW	127600 €
Energiespeicher	29700 €
Spitzenlastkessel	13700 €
Zeolithspeicher	38000 €
Gesamtkosten Anlage:	209000 €
<u>Anlagenkosten konv. Brauerei</u>	
Dampfkessel	96800 €
Gesamtkosten Anlage:	96800 €

Als Preis für das Biogas werden 8,5 ct/kWh und das Erdgas 4 ct/kWh angenommen. Das derzeitige EEG sieht einen Einspeisungspreis von 20,3 ct/kWh vor. Für beide Wärmebereitstellungsanlagen wird eine Abschreibungsdauer von 15 Jahren angenommen und dynamisch abgeschrieben.

Bei einer konventionellen Brauerei ergibt sich bei Erdgas als Brennstoff ein Wärmegestehungspreis von 5,36 ct/kWh und bei Biogas von 10,36 ct/kWh. Für das Modell BHKW/Zeolithspeicher ergibt sich bei Biogas als Brennstoff unter Berücksichtigung der Einspeisevergütung nach EEG ein Wärmegestehungspreis von 5,25 ct/kWh.

Da die Differenz der Wärmegestehungspreise zwischen Erdgas als Brennstoff und konventionellem Kessel gegenüber BHKW/Zeolithspeicher mit Biogas als Brennstoff nur 0,1 ct/kWh beträgt, ergibt sich durch den zusätzlichen Investitionsbedarf ein ROI von circa 169 Jahren. Die Verfahrensvariante ist also im Vergleich mit Erdgaskessel niemals wirtschaftlich!

Aber wie oben ausgeführt wollen gerade mittelständische Betriebe aus Wettbewerbsgründen zu erneuerbaren Energien wechseln. Dabei zeigt die Verfahrensvariante BHKW/Zeolithspeicher dann doch einen deutlichen betriebswirtschaftlichen Vorteil. Bei einer Differenz von 5,11 ct/kWh im Wärmegestehungspreis ergibt sich trotz des zusätzlichen Investitionsbedarfs von 112 200 € ein ROI von 3,4 Jahren. Das bedeutet, dass sich auch bei einer dynamischen Berechnung unter Einbeziehung eines Zinssatzes die Investition in einer Zeitspanne kleiner der Abschreibungsdauer rechnen wird.

4 Bewertung des untersuchten Verfahrens und Zukunftsperspektiven

Bei der Herstellung von Bierwürzen wird der Brauprozess im Sudhaus durch einen Kochprozess abgeschlossen. Diese energieintensive Kochung wird zur Ausdampfung geschmacksintensiver, aber unerwünschter Substanzen benötigt. Diese Kochung kann durch eine Vakuumverdampfung (SchoKo-Verfahren der Kaspar Schulz Brauereimaschinenfabrik und Apparatebauanstalt e.K.) ersetzt werden. Dabei wird die Würze nur auf 99 °C erwärmt, d.h. hohe Heizmedientemperaturen und Wärmeströme können entfallen. Dies ermöglicht unter bestimmten Voraussetzungen den effizienten Einsatz von BHKWs zur Wärmeversorgung. Dabei kann die Grundlast der Brauerei bei 80°C durch die Niedertemperaturabwärme des BHKW gedeckt werden und das Aufheizen der Würze mit der höheren Temperatur des BHKW-Abgases geschehen.

Blockheizkraftwerke sind durch die gleichzeitige Bereitstellung von Wärme und Strom sehr energieeffizient. Ihre Wirtschaftlichkeit hängt aber sehr stark von der Nutzungsdauer und den für den Strom erzielbaren Erlösen ab. Zur Erhöhung der Nutzungsdauer des BHKW wird daher ein Wärmespeicher benötigt, um die Abgaswärme optimal für den energieintensiven aber kurzen Aufkochprozess zu nutzen.

Zur Speicherung von Wärme oberhalb von 110 °C sind insbesondere Adsorptionswärmespeicher geeignet. Hierzu wird der physikalische Effekt der Adsorption von Wasser an Zeolith genutzt. Zeolithe sind poröse Alumosilikate, die große Mengen Wasser adsorbieren (binden) können, wobei Wärme freigesetzt wird. Die dabei erzielbaren Temperaturen sind so hoch, dass die freiwerdende Wärme zur Würzeerwärmung genutzt werden kann. Anschließend kann eine Regeneration durch thermisches Austreiben des Wassers erfolgen. Dabei wird Wärme auf einem niedrigeren Temperaturniveau frei, die ebenfalls in der Brauerei genutzt werden kann.

Ziel dieses Projektes war es zu untersuchen, ob die Verfahrenskombination SchoKo-Verfahren, Zeolithwärmespeicher und BHKW realisierbar ist und unter welchen Randbedingungen sich das Verfahren einsetzen lässt.

Der Zeolithspeicher wurde in Form von vier Einzelmodulen mit je 10 kg Zeolith realisiert. Jeder Zeolithspeicher besteht aus einem Absorber und einem Verdampfer/Kondensator, die in einem Vakuumbehälter angeordnet sind. Die Speicher können bei 180 bis über 200 °C Vorlaufemperatur in 3 – 5 h regeneriert werden. Die Wärmefreisetzung kann dann innerhalb von 60 Minuten bei Temperaturen von mehr als 110 °C erfolgen. Die erzielbaren Wirkungsgrade hängen von den Kondensationstemperaturen während der Regeneration der Speicher und Verdampfungstemperaturen während der Speichernutzung ab. Der Niedertemperaturwir-

kungsgrad (nutzbare Abwärme während der Regeneration) schwankt zwischen 0,45 und 0,79. Der Hochtemperaturwirkungsgrad (Freisetzung von Wärme zur Würzeerwärmung) schwankt zwischen 0,5 und 0,78. Die Wirkungsgrade wurden experimentell ermittelt. Weiteres Steigerungspotenzial konnte aufgezeigt werden. Der entwickelte Zeolithwärmespeicher erfüllt die Voraussetzungen für die Verfahrenskombination.

Für die gesamte Verfahrenskombination wurde ein Versuchstand errichtet. Dieser besteht aus einem speziell konstruierten Abgaswärmetauscher für das eingesetzte BHKW mit Dieselmotor, vier miteinander verschalteten Zeolithmodulen und sowie einer „Braueinheit“ (Würzefanne, Warmwasserspeicher und zuschaltbaren SchoKo). Als Wärmeträger wird ein Hochtemperaturträgeröl eingesetzt. Im Verlauf der Messungen stellte sich heraus, dass die Abgastemperaturen des eingesetzten BHKWs nicht für den Betrieb der Verfahrenskombination ausreichen, deshalb wurde der Versuchstand um einen Heißluftgenerator ergänzt, der ein modernes BHKW mit größerem Abgaswärmestrom simulieren kann. Die Instrumentierung des Versuchstands wurde entsprechend visualisiert. Es konnte erfolgreich gezeigt werden, dass sich der geplante Verbund miteinander kombinieren und betreiben lässt. Die brautechnischen Vorgaben werden dabei eingehalten.

Die gewonnenen Daten wurden auf ein Sudhaus mit einer Ausschlagmenge von 100 hl hochskaliert und dann die entsprechende Gesamtbrauerei in ihrem Energiebedarf und zeitlichem Lastgang simuliert. In diesem Modell wurde zusätzlich noch ein Spitzenlastkessel mitberücksichtigt. Gleichzeitig wurde diese Modellierung für eine konventionelle Brauerei durchgeführt.

Es zeigt sich, dass sich der Gesamtenergiebedarf der Modellbrauerei durch die vorgeschlagene Verfahrenskombination auf ca. 68 % der konventionellen Brauerei absenken lässt, auch wenn die Laufzeit des BHKWs nur 2704 h beträgt. Wirtschaftlich lässt sich die Verfahrenskombination rechtfertigen, wenn Biogas als Brennstoff genutzt wird und beim Verkauf des Stroms eine entsprechende Einspeisevergütung erzielt wird.

Die im Projektantrag gesteckten Ziele wurden, wenn auch teilweise verzögert, erreicht. In Folge der im Rahmen des Projekts gesammelten Erfahrungen und Erkenntnissen ist die Brauereimaschinenfabrik Kaspar Schulz in der Lage das Gefäß eines Zeolithspeichers, wie er für den Einsatz in Kombination mit einem Blockheizkraftwerk in einer Brauerei mit unterschiedlicher Betriebsgröße, oder weiteren industriellen Prozessen mit ähnlicher Wärmebedarfstruktur, benötigt wird, auszulegen und zu fertigen.

Die derzeitigen wirtschaftlichen und politischen Gegebenheiten lassen nur einen Einsatz den engen Randbedingungen Biogas und EEG-Nutzung zu. Rein unter den Gesichtspunkten der CO₂-Einsparung und Energieeffizienz ist das Verfahren als sehr positiv zu werten. Die Kaspar Schulz Brauereimaschinenfabrik und Apparatebauanstalt e.K. ist nun in der Lage, ein weiteres umweltfreundliches Verfahren für die Brauindustrie anzubieten.

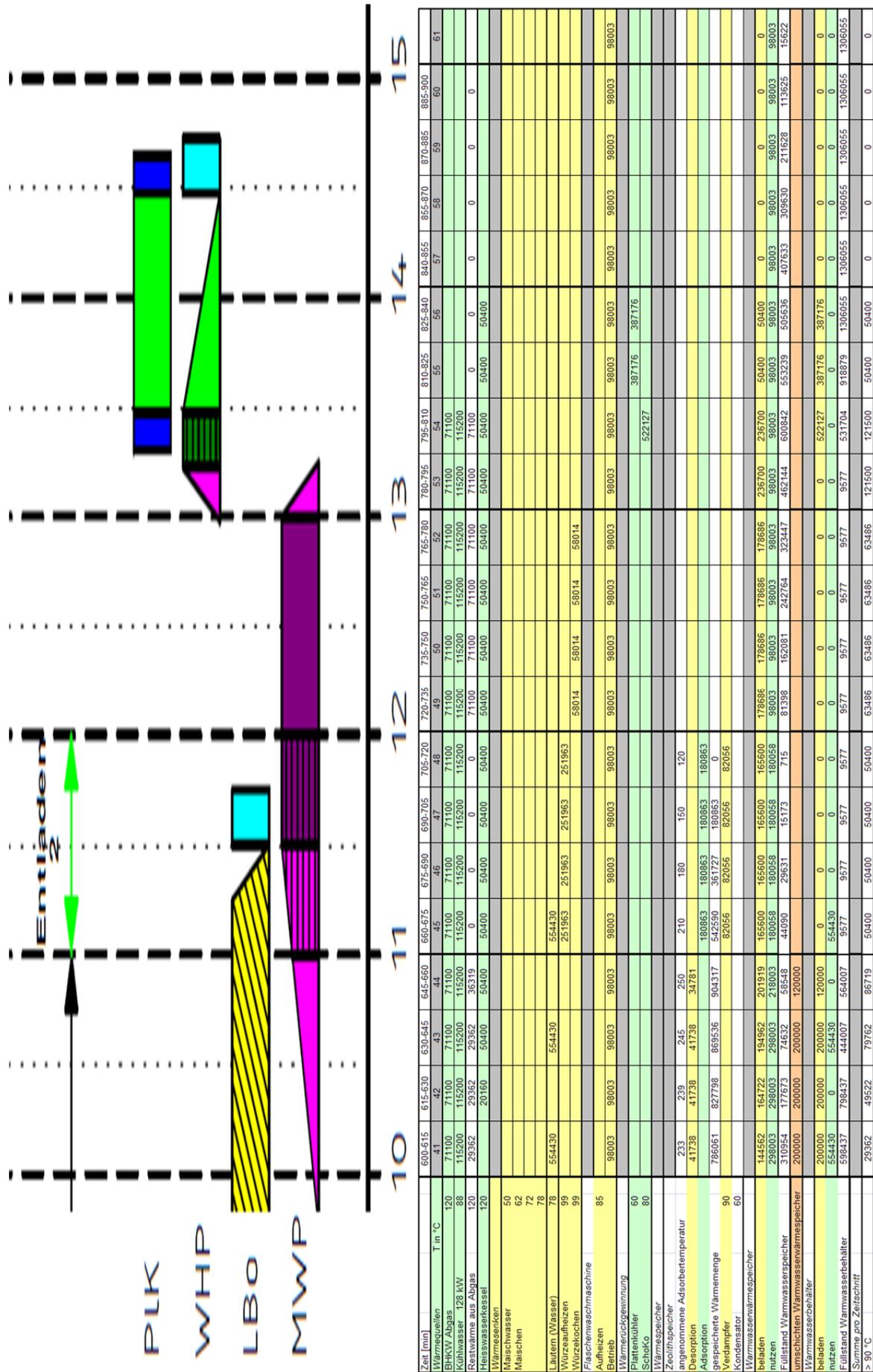
5 Literaturverzeichnis

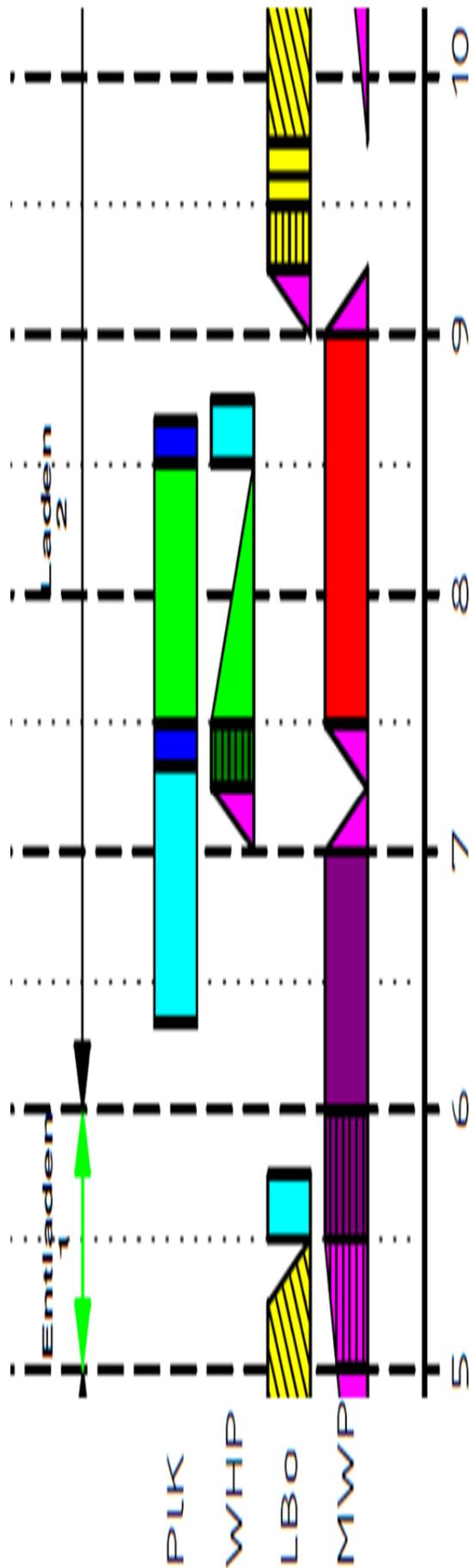
1. J. Binkert, D. Haertl: Klimaschutz als Beitrag zum Betriebsergebnis, Brauwelt Nr. 41-42, 2007
2. Vortrag Energiepavillion BrauBeviale 2007, Nürnberg, Firmenmitteilung Kaspar.
3. Bochmann, G., Herfellner, T., Pesta, G.: Die emissionsarme Brauerei – Möglichkeiten zur Verknüpfung von Energie- und Umwelttechnik. Der Weihenstephaner, 2006, 3, p. 114 - 117.
4. Walter Wagner: Wärmeaustauscher. Würzburg: Vogel Industrie Medien GmbH & Co.KG, 1998
5. Heinz Petersen: Brauereianlagen. Nürnberg: Carl 1993
6. Binkert, Jork; Haertl, Dietram (2001), Neues Würzekochsystem mittels Expansionsverdampfung. In: Brauwelt, Jg. 37, S. 1494-1503
7. Werner Kast, Adsorption aus der Gasphase, Werner Kast Verlag, 3-527-26719-0, Weinheim, 1988
8. http://www.kaspar-schulz.com/index.php?article_id=78&clang=1 (5. Oct. 2010)
9. <http://www.geoberg.de/2010/06/12/zeolithe-mineralogie-und-nutzung/#4> (9.Oct. 2010)
10. Vereinigte Werkstätten für Pflanzenöltechnologie (Hg.) (1998): Betriebsanleitung Blockheizkraftwerk Typ KW5-3 AP.
11. VDI-Wärmeatlas: [Berechnungsunterlagen für Druckverlust, Wärme- und Stoffübergang]. 10., bearbeitete und erweiterte Auflage (2006). Berlin: Springer.
12. Dubbel, Heinrich; Beitz, Wolfgang (1983): Taschenbuch für den Maschinenbau. 15., korrigierte und ergänzte Auflage. Berlin: Springer.
13. Baehr, H.D. und Stephan, K. Wärme- und Stoffübertragung. Springer-Verlag, Berlin 2010.
14. Demharter, M. Heat Transport in Evacuated Perlite Powder Insulations and Its Application in Long-Term Hot Water Storages, Masterarbeit an der Technischen Universität München, 2011

6 Anhang

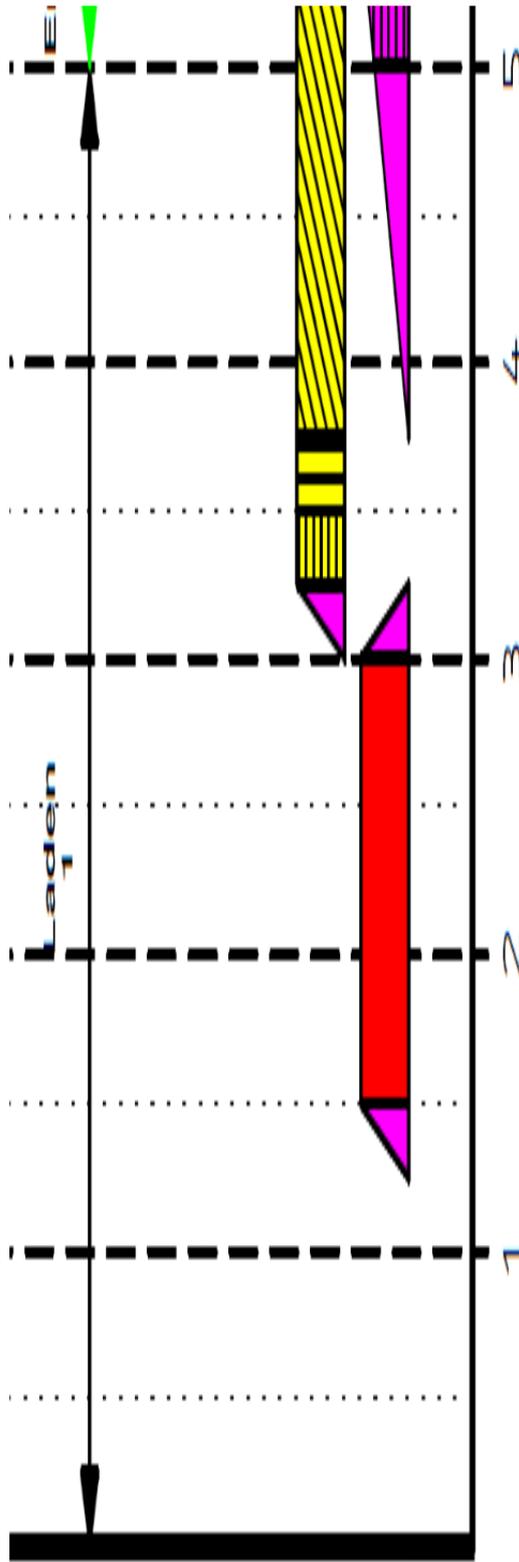
6.1 Darstellung der Modellierung in Excel

Auf den folgenden 3 Seiten ist die Modellierung der Verfahrenskombination bestehend aus Blockheizkraftwerk, Zeolithwärmespeicher und Schonkocher dargestellt. Die Berechnung ist viertelstündlich aufgelöst und die Zahlenwerte entsprechen Wärmemengen in kJ. Die Wärmemengen beziehen sich auf ein Sudhaus mit 100 hl Größe.





Zeit [min]	300-315	315-330	330-345	345-360	360-375	375-390	405-420	420-435	435-450	450-465	465-480	480-495	495-510	510-525	525-540	540-555	555-570	570-585	585-600
Wärmequellen	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
BHKW Abgas	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100
Kühlwasser 128 kW	88	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200
Restwärme aus Abgas	120	0	0	0	57187	8493	15450	15450	15450	22406	22406	22406	22406	29362	29362	29362	29362	29362	29362
Heisswasserkessel	120				50400	50400	50400												
Wärmesenken																			
Maischewasser	50								860322										
Maischen	62								340690				283908						
	72																		
	78																		
Läuern (Wasser)	78	554430																	
Wurzaufheizen	99	251963	251963	251963															
Wurzelkochen	99				58014	58014	58014	58014											
Flaschenwaschmaschine												113500	113500	113500	113500	113500	113500	113500	113500
Aufheizen																			
Betrieb	85																		
Wärmerückgewinnung																			
Plattenkühler	60																		
Schoko	80																		
Wärmespeicher																			
Zentralspeicher																			
angenommene Adsorbertemperatur	210	180	150	120	122	131	140	148	156	161	171	178	185	191	197	203	209	215	221
Adsorption	180863	180863	180863	180863	13913	62607	62607	59550	59550	59550	48694	48694	48694	41738	41738	41738	41738	41738	41738
gespeicherte Wärmemenge	542590	381727	180863	0	13913	76519	139126	194776	250426	306077	354771	403465	452159	493896	535634	577372	619110	660847	702585
Verdampfer	80	82056	82056	82056															
Kondensator	60																		
Wärmespeicher																			
Beladen	115200	115200	115200	115200	164773	116079	123036	130650	130650	130650	137606	137606	144562	144562	144562	144562	144562	144562	144562
nutzen	82056	82056	82056	82056	50000	50000	100000	100000	100000	340690	340690	113500	397408	113500	283845	113500	113500	113500	113500
Füllstand Wärmespeicher	261883	295028	328172	361317	476090	542769	558249	587284	611934	742594	701212	483965	479428	340145	371207	402270	433332	464394	464394
umschichteten Wärmespeicher					50000	50000	100000	100000	100000										
Wärmespeicher																			
beladen	0	0	0	0	50000	50000	100000	100000	522127	387176	387176	0	0	0	0	0	0	0	0
nutzen	554430	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Füllstand Wärmespeicher	116711	116711	116711	116711	166711	216711	316711	416711	516711	178515	565691	952867	952867	952867	952867	952867	952867	952867	952867
Summe pro Zeitschritt																			
> 90 °C	0	0	0	0	49573	879	7836	15450	22406	22406	22406	22406	29362	29362	29362	29362	29362	29362	29362



PLK

WHP

LBO

MWP

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
Wärmequellen	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	71100	
BHKV Abgas	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	115200	
Kühwasser 128 kW	8493	8493	8493	8493	8493	8493	8493	8493	8493	8493	8493	8493	8493	8493	8493	8493	8493	8493	8493	8493	8493	
Restwärme aus Abgas	57187	57187	57187	57187	57187	57187	57187	57187	57187	57187	57187	57187	57187	57187	57187	57187	57187	57187	57187	57187	57187	
Heißwasserkessel	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	
Wärmerückföhrer																						
Mischwasser	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
Maischen	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	
76																						
78																						
Lautern (Wasser)																						
Wurzelaufheizen																						
Wurzeloekochen																						
99																						
Flaschenwaschmaschine																						
85																						
Aufheizen																						
Betrieb																						
Wärmerückgewinnung																						
60																						
Schoko																						
80																						
Wärmespeicher																						
Zeroltspeicher																						
angenommene Adsorbentemperatur	122	131	140	148	156	164	171	178	185	191	197	203	209	215	221	227	233	239	245	250	250	
Desorption	13913	62607	62607	55650	55650	55650	48694	48694	48694	41738	41738	41738	41738	41738	41738	41738	41738	41738	41738	41738	41738	
Adsorption																						
gespeicherte Wärmemenge	13913	76519	139126	194776	250426	306077	354771	403465	452159	493896	535634	577372	619110	660847	702585	744323	786061	827798	869536	904317	904317	
Verdampfer																						
Kondensator																						
60																						
Wärmewärmespeicher																						
beladen	172387	123693	123693	130650	130650	130650	137606	137606	137606	144562	144562	144562	144562	144562	144562	144562	144562	144562	144562	144562	144562	
nutzen	0	0	0	100000	100000	100000	100000	100000	100000	383908	100000	270345	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	
Wärmewärmespeicher																						
nutzen	172387	296081	419774	450424	481074	511723	208639	246245	283851	44505	89067	13685	58247	102809	147371	241934	236896	231858	226821	228739	228739	
umsichtiges Wärmewärmespeicher																						
beladen	0	0	0	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	
nutzen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Wärmewärmespeicher																						
beladen	590323	590323	590323	690323	790323	3001	130001	230001	330001	430001	530001	630001	730001	830001	930001	980001	980001	980001	980001	980001	980001	
nutzen																						
Fullstand Wärmewärmespeicher																						
Summe pro Zeitschritt	57187	8493	8493	15450	15450	15450	22406	22406	22406	29362	29362	29362	29362	29362	29362	29362	29362	29362	29362	29362	29362	
> 80 °C																						
86719																						

6.2 Veröffentlichungen

Heike Schreiber, Birger Klitzing und André Bardow
Zeolithspeicher zur Lastverschiebung für die energieeffiziente Wärmeversorgung einer Brauerei
Thermodynamik-Kolloquium 2011, 04.-06. Oktober 2011, Frankfurt am Main

Heike Schreiber und André Bardow
Forschungsprojekt zur Speicherung und Temperaturerhöhung von KWK-Wärme in industriellen Prozessen
Fachtagung „Innovation bei der Speicherung und dem Transport von Wärme und Biogas“, 26. September 2012, Dortmund

Heike Schreiber und André Bardow
Adsorptionswärmespeicher für industrielle Batch-Prozesse
7. Internationale Konferenz und Ausstellung zur Speicherung Erneuerbarer Energien (IRES 2012), 12.-14. November 2012, Berlin

Integrating Cogeneration and Heat Storage for Energy-Efficient Industrial Batch Processing
Heike Schreiber, Birger Klitzing, Franz Lanzerath, Andreas Gebhardt and André Bardow
EuroHeat&Power, English Edition Vol. 10 I/2013

Alin Diaconu, Birger Klitzing und Winfried Ruß
High temperature Zeolith storage for the brewery
33rd European Brewery Convention (EBC) Congress, 22 – 26 May 2011, Glasgow

Alin Diaconu, Winfried Ruß, Birger Klitzing und Ioana Ionel
A new Way for Energy Supplying in the Beer Industry
Journal of Environmental Protection and Ecology (JEPE), Re No 1880/20.12.2010

Alin Diaconu und Winfried Ruß
Hochtemperaturwärmespeicher für die Brauerei
Alexander von Humboldt College, 22-28 November 2010, Timisoara

Alin Diaconu und Winfried Ruß
Improving the Energy Supplying in the Beer Industry
Global and Regional Environmental Protection (GLOREP), 26-28 November 2010, Timisoara

Alin Diaconu und Winfried Ruß
Hochtemperaturwärmespeicher für Brauereien
43. Technologisches Seminar, 26-28 Januar und 2-4 Februar 2010, Freising

Alin Diaconu und Winfried Ruß
Hat der Kessel ausgedient? Wärmebereitstellung in der Brauerei mit BHKW und Wärmespeicher
Brau Industrie, Nr. 10 Oktober 2009, Verlag W. Sachon GmbH, 87714 Mindelburg