Holzpelletbetriebene Absorptionskälteanlage

Manuel Kausche[1*], Martin Helm[1],
Manuel Riepl[1], Wolfgang Aich[2]

[1] ZAE Bayern e.V., Bereich *Energiespeicherung* – Arbeitsgruppe *Wärmetransformation*,
Walther-Meißner-Straße 6, 85748 Garching, Deutschland
Manuel.Kausche@ZAE-Bayern.de

[2] HDG Bavaria GmbH, Siemensstr. 22, 84323 Massing, Deutschland

* Korrespondenzautor

Kurzfassung

Im vom BMWK geförderten Forschungsvorhaben „BioWap“ (FKZ 03KB127) entwickelte das ZAE Bayern zusammen mit dem Kesselhersteller HDG Bavaria GmbH das Funktionsmuster einer mittels holzartiger Biomasse (Pellets, Hackschnitzel) direkt befeuerten Absorptionskälteanlage (Arbeitsstoffpaar Lithiumbromid & Wasser(R718)) mit einer nominellen Kälteleistung von 55 kW_{th}.

Die Kopplung des neuartigen, direkt mit Biomasse befeuerten Hochtemperaturdesorbers mit integriertem Brennraum und einer rohrbündelbasierten kompakten Absorbereinheit zu einer zweistufigen Kältemaschine zeigt im Laborbetrieb einen hocheffizienten brennstoffbezogenen Wirkungsgrad zur Kältebereitstellung BUE_{Cold} von etwa 1,0. Im Vergleich zur konventionellen Kopplung von Biomassekessel mit einer mit Warmwasser angetriebenen einstufigen Absorptionskälteanlage ($BUE_{Cold} \approx 0{,}65$) verbessert sich dieses Verhältnis aus nutzbarer Kälteleistung zu eingesetzter Brennstoffenergie bei vergleichbarem Anlagenaufwand um den Faktor 1,5. Mit einer Temperaturspreizung von 4 K wurden Kaltwasser-Eintrittstemperaturen zwischen 15 und 8 °C vermessen und dabei Rückkühltemperaturen zwischen 38 und 43 °C realisiert, die eine trockene Rückkühlung in gemäßigten Breiten erlauben. Das Wärmeverhältnis der AKM erreichte hierbei sehr gute Werte von bis zu $\zeta_{Cold} = 1{,}24$. Ökonomische Betrachtungen attestieren dem Systemkonzept zudem eine wirtschaftliche Anwendbarkeit und Marktchance.

Stichwörter:
Biomasse, Holzpellets, Lithiumbromid (LiBr), Mehrstufig, Absorptionskälteanlage, Wärmepumpe

1 Einleitung

Kälte, Wärme und Brauchwarmwasser in Wohnquartieren, Industriebetrieben oder öffentlichen Verwaltungsgebäuden müssen vorrangig mit nachhaltigen Energiequellen versorgt werden, um den Effekt des Klimawandels so schnell wie möglich zu verringern. Es ist dabei besonders wichtig, dass der Ersatz fossiler Energieträger durch kostengünstige erneuerbare Alternativen mit hoher Versorgungssicherheit einhergeht. Aktuelle Einflüsse und Einschränkungen auf die weltweiten Lieferketten zeigen zudem auf, wie wichtig regional verfügbare und speicherbare Energiequellen und deren Wertschöpfungsketten sind.

Die Deckung des Wärme- und Kältebedarfs für die Gebäudeklimatisierung macht etwa ein Drittel des gesamten Energiebedarfes in Deutschland aus. Um Treibhausgasemissionen zu vermeiden, werden heutzutage hierfür vorrangig Geothermie, Sonne, Biomasse oder durch Wärmepumpen aufgewertete Umgebungswärme eingesetzt. Der Energiequellenmix ist dabei nach wie vor unausgeglichen und wird wohl erst nach einer langanhaltenden Übergangsphase das notwendige Niveau erreichen. So deckte beispielsweise im Jahr 2016 die holzartige Biomasse 10,7 % des gesamten Wärmebedarfs in Deutschland [1] und ist damit nach wie vor die bei weitem dominierende Energiequelle für erneuerbares Heizen. Es gibt für diese Ressource sicherlich noch Entwicklungs- und Erschließungsperspektiven, das Potential der Biomasse ist jedoch auch begrenzt und in manchen Anwendungsfeldern und Ländern beinahe ausgeschöpft. Zudem werden im Mittel etwa 2,3 % des gesamten deutschen Endenergiebedarfs für Kühlung aufgewendet. Am gesamten Strombedarf macht die Kälteerzeugung sogar einen Anteil von etwa 12,5 % aus [2].

Um diesem aktuellen und zukünftig bestehenden, eher steigenden Bedarf an effizient bereitgestellter Kälte und Wärme insbesondere aus Biomasse nachzukommen, hat das ZAE Bayern ein neuartiges, flexibles, mit Biomasse gefeuertes Heiz- und Kühlsystem („biomass sorption heating and cooling“ = bioSHC-System) erarbeitet. Ein grundlegendes „Proof-of-Concept“ wurde bereits in einem deutsch-finnischen SET-Plan Forschungsprojekt erfolgreich durchgeführt [3]. Das ZAE Bayern setzte diese Entwicklung in Kooperation mit dem Biomasse-Kesselhersteller HDG Bavaria und der Unterstützung des BMWK im Projekt „BioWap“ fort.

Das nun hier vorgestellte Konzept wurde in einem Funktionsmuster umgesetzt. Die Einbindung in einen speziell ausgelegten Laborteststand erlaubt eine präzise, realitätsnahe Vermessung und eine wissenschaftlich fundierte Bewertung. Dieses bioSHC-System wurde als ökonomisch relevante Heizeinheit mit einer thermischen Nennleistung von etwa 100 kW Wärme bzw. 55 kW Kälte entwickelt. Der integrierte thermische Wärmepumpenprozess verdoppelt die Effizienz im Vergleich zu herkömmlichen Heizkesseln, sodass damit bis zu 50 % der Emissionen reduziert werden können. Im Vergleich zu konventionellen Kühlsystemen mit Biomasseantrieb ist eine Effizienzsteigerung um mehr als 35 Prozentpunkte erreichbar. Zudem wird die Belastung des Stromnetzes, verglichen mit konventionellen elektrischen Wärmepumpen und Kälteanlagen, stark verringert.

Biomasseenergie soll in diesem Kontext als Problemlöser dienen, der immer dort ideal einzusetzen ist, wo andere Klimaschutztechnologien an ihre Grenzen stoßen. Biomasse sollte also fossile Ressourcen überall dort ersetzen, wo wenig klimafreundliche Alternativen existieren oder ein langfristiges Überangebot an Holz zu erwarten ist. Der Technologieansatz im Projekt „BioWap“ ist entsprechend nicht als Konkurrenzmodell zu konventionellen Klimatisierungssystemen zu verstehen, sondern als Ergänzung. Er bietet sich als attraktive, umweltfreundliche Alternative an, wo beispielsweise vollumfängliche Raumkühlung mit erneuerbarem Strom nicht möglich ist.

Zielsetzung des Projektes war es, eine Anlage zu entwickeln, welche mit den üblichen Fertigungsschritten von Biomassekesselherstellern produziert werden kann. Dies erlaubt zukünftig eine kostenattraktive Herstellung und damit die Erschließung zahlreicher Anwendungen in Wohn- und Betriebsgebäuden, insbesondere im Hinblick auf den weltweit wachsenden Kühlbedarf.

2 Grundlagen, System- und Teststandskonzept

Die Kombination aus Biomasseverbrennung und Absorptionskältetechnik bietet eine effiziente und umweltfreundliche Möglichkeit zur Kältebereitstellung wie auch für Niedertemperaturwärmeversorgung mit einem gewissen Anteil an Umweltwärme und minimalem Stromverbrauch. Die Mehrstufigkeit des Kältekreislaufs reduziert den Biomasseeinsatz erheblich. Dennoch müssen die Vor- und Nachteile sorgfältig abgewogen werden, sowohl im Hinblick auf die wirtschaftliche Machbarkeit als auch auf ein einfaches, robustes und zuverlässiges Systemdesign. Durch den Anspruch, auch den kleinen und mittleren Leistungsbereich um 100 kW bedienen zu

können, wird ein eng aufeinander abgestimmtes Anlagensystem relevant, das besonders kostengünstig hergestellt werden kann. Dies erfordert bereits beim Entwurf entsprechende Maßnahmen.

2.1 Vorteile eines zweistufigen Heiz- und Kühlsystems mit direkter Biomassefeuerung

Mehrstufige Absorptionskälteanlagen sind in den letzten Jahrzehnten vielfach thematisiert und untersucht worden. So hat beispielsweise Ziegler [4] gezeigt, dass die Nutzung der Antriebsenergie in einer Kaskade zu einer deutlich höheren Effizienz führt. Gleichzeitig ist die Umsetzbarkeit durch die zwangsläufig steigenden Temperaturen der Antriebsenergiequelle und der Arbeitsstoffpaare begrenzt.
Das in dem hier vorgestellten System verwendete Arbeitsstoffpaar ist wässrige Lithiumbromidlösung (H_2O/LiBr) mit Wasser als Kältemittel. Das Stoffpaar hat aufgrund zunehmender Korrosivität zwischen 150 °C und 170 °C einen üblichen oberen Bereich der Anwendungstemperaturen. Die Realisierung eines mehrstufigen Konzepts ist daher durch die wirtschaftlich vertretbare Verfügbarkeit von Werkstoffen und Bauteilen begrenzt. Zudem steigt mit zunehmender Stufenzahl die Komplexität und der Aufwand für Wärmeübertrager und Armaturen.
Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen wurde für das hier vorgestellte System ein zweistufiges Konzept gewählt, das einen guten Kompromiss aus Leistungsfähigkeit, Kosten und Komplexität darstellt. Betrachtet man das Wärmeverhältnis ζ nach Gleichung (1) als Quotient aus am Verdampfer bereitgestellter Nutzkälte ($\dot{Q}_V$) und der am Desorber eingekoppelten Antriebsenergie ($\dot{Q}_D$), so wird die Effizienzsteigerung deutlich:
Moderne einstufige Absorptionskälteanlagen ermöglichen eine $\zeta_{Cold,SE} \geq 0{,}8$. Die zweistufige Bauart ermöglicht Werte bis zu $\zeta_{Cold,DE} \geq 1{,}4$.

$$\zeta_{\mathrm{Cold}} = \frac{\dot{Q}_V}{\dot{Q}_D} \tag{1}$$

Kommerzielle zweistufige Anlagen werden in der Regel mit Nennleistungen von einem Megawatt und höher vertrieben. Neben direkt gas- und ölbefeuerten Anlagen ist in dieser höheren Leistungsklasse auch der Einsatz von dampfbetriebenen oder druckbeaufschlagten Heißwasseranlagen wirtschaftlich vertretbar. Im Allgemeinen greift man bei kleineren Leistungen auf einstufige warmwasserbetriebene Absorptionskälteanlagen zurück.
Um fossile Energieträger in kleineren Anlagen zu ersetzen, muss das Augenmerk auf Abwärme, Solarwärme oder auf den gut speicher- bzw. lagerbaren, häufig lokal verfügbaren Brennstoff Holz zum direkten Antrieb von Absorptionswärmepumpen gerichtet werden. Holzartige Biomasse ist hier als am häufigsten eingesetzter und standardisierter Brennstoff interessant – zumal die thermische Verwertung seit langem technisch ausgereift ist.
Es ist eine direkt biomassebefeuerte zweistufige Kälteanlage im mittleren Leistungsbereich realisierbar: Die Wärme im heißen Rauchgas treibt das Kältemittel direkt im Hochtemperatur-Desorber (D_2) aus, wobei die hohe Steigerung des Wärmeverhältnisses gegenüber einer warmwassergetriebenen einstufigen Variante auf das 1,7-Fache ($\zeta_{cold,DE}$ / $\zeta_{cold,SE}$) erreicht wird. Die Kosten durch die Anschaffung der Absorptionskälteanlage (AKM) werden bei der zweistufigen Anlage besser amortisiert: Eine grobe Abschätzung zeigt, dass die Investitionskosten für die direkt mit Biomasse befeuerte zweistufige Absorptionskälteanlage (bioSHC-Anlage) nahezu gleich hoch sind wie für eine einstufige AKM, die an einen mit Biomasse befeuerten Warmwasser-Kessel angeschlossen ist.
Außerdem ist der Wirkungsgrad der Verbrennungseinheit in Bezug auf den bereitgestellten Brennstoff bei beiden Systemen nahezu gleich. Die Abgastemperatur für die Holzfeuerung wird bei Nennbetriebsbedingungen in der realen Anwendung häufig auf 160°C oder höher eingestellt, was die Nutzung der meisten in Gebäuden installierten Schornsteine erleichtert. Die maximal zulässige Temperatur des Arbeitsstoffpaares ermöglicht auch im zweistufigen System eine gute Rauchgasauskühlung, sodass die Brennstoffenergie (bezogen auf den unteren Heizwert H_i) im bioSHC-System zu etwa 88 % für den Antrieb genutzt werden kann, während in konventionellen Heizkesseln Werte um 91 % erreicht werden.
Das bioSHC-System erreicht damit nach Gleichung (2) theoretisch eine kältebezogene Biomasse-Nutzungseffizienz (Biomass Utilisation Efficiency), also dem Quotienten aus Nutzkälte und Produkt aus Brennstoffmassenstrom $\dot{m}_B$ sowie dem unteren Heizwert, von $BUE_{cold} \approx 1{,}1$.

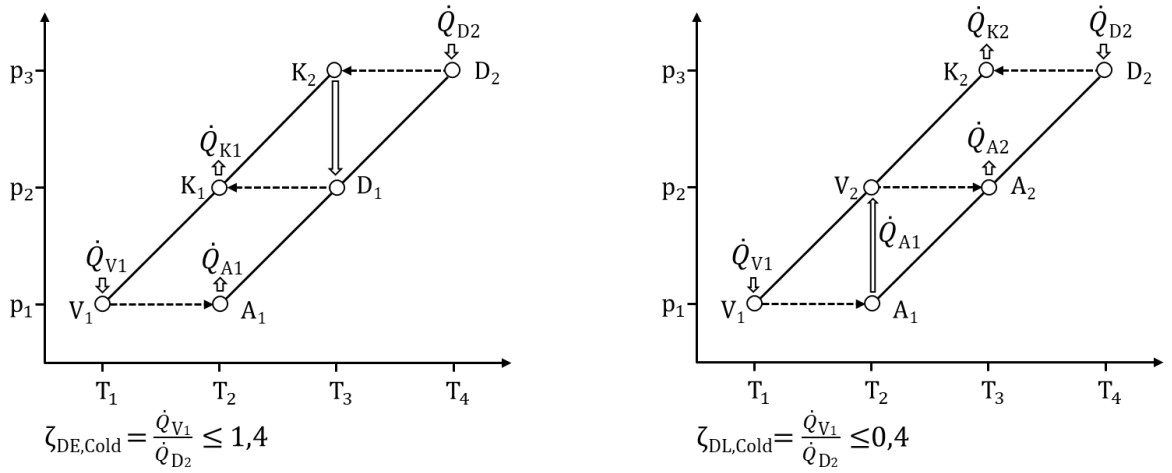
$$\mathrm{BUE_{Cold}} = \frac{\dot{Q}_V}{\dot{m}_B \cdot H_i} \tag{2}$$

Konventionelle Systeme, bestehend aus einem Warmwasserkessel und einer einstufigen AKM, erreichen eine Effizienz von $BUE_{Cold} \approx 0{,}65$. Mit der signifikanten Verminderung des herkömmlichen Brennstoffeinsatzes bei gleicher Kälteleistung können durch den Einsatz eines zweistufigen Systems die Emissionen (Staub, CO_2 usw.) in gleichem Maße reduziert werden.

Im folgenden Abschnitt wird dargelegt, dass der mehrstufige Aufbau zudem weitere Vorteile in Bezug auf die Vielfalt der Betriebsarten mit sich bringt.

2.2 Implementierte Betriebsmodi

Das bioSHC-System wurde im Projekt „BioWap“ vorrangig als Wärmepumpensystem ausgelegt. Daher wurden alle Komponenten auf der Grundlage der Analyse geeigneter Umgebungswärmequellen für Absorptionswärmepumpen ausgearbeitet. Dabei bestand das Ziel darin, eine möglichst niedrige Temperatur des Kältemittels zu nutzen. Um ein inneres Einfrieren zu vermeiden, muss die Verdampfungstemperatur des Kältemittels H_2O auf etwa 1 °C limitiert werden. Somit wird die Vielzahl an allgemein verfügbaren Umweltwärmequellen für H_2O/LiBr-Wärmepumpen im Speziellen eingeschränkt. Trotzdem ist das Potenzial von Wärmequellen, die Temperaturen von mehr als 8 °C liefern - etwa Grundwasser, Abwasser oder Erdwärmesonden - bemerkenswert. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass in ländlichen Gebieten, wo Biomasse als Brennstoff eher verbreitet und damit verfügbarer ist als in Städten, diese Art von Umgebungswärmequellen ebenfalls wahrscheinlicher sind. Zusätzlich werden in aktuellen Forschungsprojekten zuverlässige und ausreichend effiziente Verdampfersysteme für modifizierte Kältemittel auf Basis von Wasser untersucht. Erfolgreiche Forschung vorausgesetzt, könnten dann Umweltwärmequellen, welche Energie mit Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes von Wasser liefern, integriert werden.
Aufgrund dieser Auslegungsrandbedingungen ist das bioSHC-System aus dem Projekt „BioWap“ nun in der Lage, Kaltwassertemperaturen um 4 °C bei einer Rückkühltemperaturen von etwa 41 °C bereitzustellen.
Für konventionelle Raumklimatisierung sind diese Randbedingungen übererfüllend, da durch die höheren Rückkühltemperaturen die trockene Rückkühlung der Kältemaschine und damit wartungsarmer und wassersparender Kühlbetrieb erst ermöglicht wird.
Im Wesentlichen besteht das bioSHC-System aus drei Teilsystemen - einem direkt mit Biomasse befeuerten Desorber, also der zweiten Antriebsstufe inklusive Kondensator, einer einstufigen (Single-Effect-) Absorptionskältemaschine bzw. -wärmepumpe und einem vorgefertigten Hydrauliksystem, welches eine einfache Implementierung in Gebäuden und deren Regelsystemen ermöglicht und Auslegungsfehler unterbindet.



a) Double-Effect-Modus (DE) *b) Double-Lift-Modus (DL)*

Bild 1: Schematische Darstellung der beiden Hauptbetriebsmodi des bioSHC-Systems

Maßgeblich für die Planung und Auslegung war der Double-Effect-Modus (DE), siehe Bild 1a). Das realisierte Konzept erfordert für diese Betriebsart sechs Hauptwärmetauscher. Die unteren vier Wärmetauscher Verdampfer (V_1), Absorber (A_1), Kondensator (K_1) und Desorber (D_1) sind als Rohrbündel in zwei Behältern realisiert und bilden eine separate Einheit, die als einstufiges oder Single-Effect-System (SE) betrieben werden kann. Ein Hochtemperatur-Desorber (HTD oder D_2) und ein zweiter Kondensator (K_2) werden zum Aufbau des Double-Effect-Systems (DE) hinzugefügt. Der zweite Desorber D_2 ist dabei das innovative Kernstück. Dieser direkt mit Biomasse befeuerte Desorber wurde im Projekt mit einer Antriebsleistung von etwa 50 kW und einer Verbrennungsleistung von 55 kW entworfen.

Die Kaskadennutzung der Energie aus der Verbrennung erfolgt durch Kopplung von K_2 und D_1 über einen externen Wärmeträger. In Bild 1a) ist dieser externe Wärmetransport als Doppellinienpfeil zwischen den Hauptkomponenten dargestellt. Die verbindenden, durchgehenden Linien folgen der logarithmischen Darstellung des Druckverlaufs (Ordinate) für konstante Salzkonzentrationen in Abhängigkeit von Gleichgewichtslösungstemperaturen (Abszisse). Die gestrichelten Linien stellen den Dampfstrom des Kältemittels zwischen den Komponenten dar. Damit sind die vier resultierenden Temperatur- und drei Druckniveaus des bioSHC-Systems sichtbar.
Bild 1b) zeigt, dass ein zusätzlicher Modus für einen sehr hohen Temperaturhub möglich ist, indem die in den Verdampfer V_1 eingekoppelte Niedertemperaturwärme („Kälte“) $\dot{Q}_{V1}$ zweimal angehoben wird. Dieser Double-Lift-Modus (DL) erfordert, dass der Verflüssiger bzw. Kondensator K_1 als zweiter Verdampfer (V_2) und der Desorber D_1 als weiterer Absorber (A_2) auf einem höheren Druckniveau arbeitet. Für die alleinige Kältebereitstellung ist ein solcher Temperaturhub relevant, wenn Temperaturen weit unter 0 °C erreicht werden sollen, während das Rückkühltemperaturniveau signifikant über dem Umgebungstemperaturniveau liegen soll oder muss.
Durch die Kopplung von K_2 und D_1 im DE-Modus über das Wärmeträgermedium Wasser ist der Kreislauf einerseits auf etwa 100 °C limitiert. Andererseits besteht hierdurch die Möglichkeit, externe Antriebswärmequellen, beispielsweise Solarthermie, einzuspeisen und damit weiteren Brennstoff bei der Bereitstellung von Kälte und Wärme einzusparen.

2.3 Stationäres Simulationsmodell

Das gezeigte Systemkonzept wurde in einer komponentenbasierten Simulation auf Basis physikalischer Stoffdaten sowie Masse-, Salz- und Energiebilanzen modelliert. Die stationäre Simulationsstudie in der Software *Engineering Equation Solver* (EES) führte zu einem Optimum der Wärme- und Stoffübertragungsflächen bei Variation der Temperaturspreizungen und unterschiedlicher interner und externer Systemparameter. Die Hauptergebnisse der theoretischen Leistungsfähigkeit, des Wärmeverhältnisses, der Auslegungstemperaturen und der Biomasse-Nutzungsgrade für den Double-Effect-Modus und den Double-Lift-Modus bei Nennbedingungen sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Auslegungskennzahlen des bioSHC-Systems

Kennzahl	Abkürzung & Gleichung	Einheit	Double-Effect	Double-Lift
Temp. Kaltwasser	$T_{Kälte}$ (Vorlauf | Rücklauf)	°C	4 | 8	4 | 8
T. Warmwasser	$T_{Wärme}$ (Vorlauf | Rücklauf)	°C	41 | 31	90 | 70[(a)]
Temperaturhub	$T_{Hub} = T_{Wärme\ VL} - T_{Kälte\ VL}$	K	37	86
Nennleistung	$\dot{Q}_{Wärme} \mid \dot{Q}_{Kälte}$	kW	111 | 62	66 | 16
$\zeta_{Heat} \mid \zeta_{Cold}$ [(b)]	$\dot{Q}_{Wärme} \cdot \dot{Q}_{D2}^{-1} \mid \dot{Q}_{Kälte} \cdot \dot{Q}_{D2}^{-1}$	-	2,22 | 1,23	1,31 | 0,30
BUE_{Heat} [(c)]	$\dot{Q}_{Wärme} \cdot (\dot{m}_{Brennstoff} \cdot H_i)^{-1}$	-	1,99	1,18
BUE_{Cold} [(c)]	$\dot{Q}_{Kälte} \cdot (\dot{m}_{Brennstoff} \cdot H_i)^{-1}$	-	1,10	0,27

[(a)] max. 85 °C machbar [(b)] Wärmeverhältnis [(c)] Referenz unterer Heizwert (H_i)

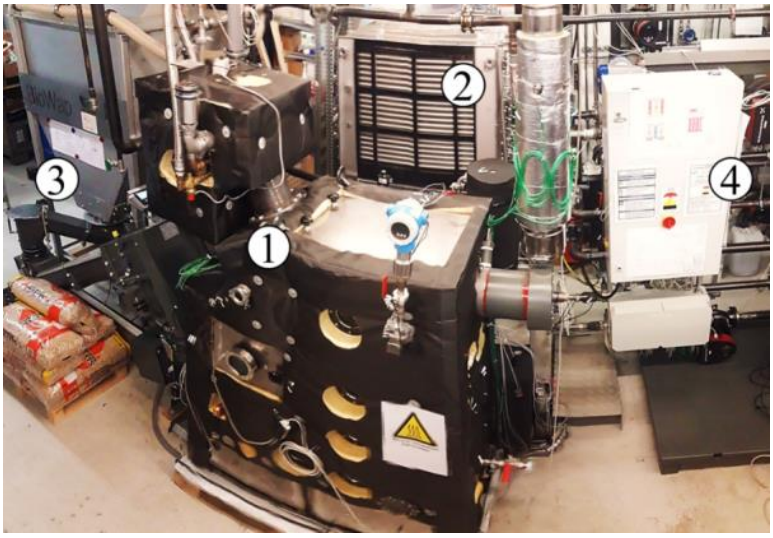
Als Randbedingungen wurden die maximal zulässige LiBr-Salzkonzentration und Temperatur der Lösung, externe- und interne Prozesstemperaturen, Wärmeübergänge und Wärmetauscherwirkungsgrade festgelegt. Zusätzlich wurde die Benetzung der Rohrbündel und damit die Umläufe im Lösungs- und Kältemittelkreislauf auf der Basis von Messungen anlagenspezifisch berücksichtigt.
Die Kennzahlen in Tabelle 1 ergeben sich aus dem Series-Flow-Modell, d.h. dem erforderlichen kontinuierlichen Strom der wässrigen Lithiumbromidlösung, der im Double-Effect zuerst den HTD und dann den Desorber D_1 zur Regeneration passiert.
Da der Auslegungspunkt in der Praxis selten exakt eingehalten wird, muss das System insbesondere gegenüber schwankenden Rücklauftemperaturen unempfindlich sein. Eine Variation der Temperaturen und deren Streuung

im Kalt- oder Kühlwasser zeigt in der Simulation eine geringe Empfindlichkeit hinsichtlich der Kälteleistung und dem Wärmeverhältnis ζ. Wird die Temperatur $T_{Kälte}$ von 3 °C bis 6 °C sowie die Temperaturspreizung im Kaltwasserkreis von 3 K bis 10 K variiert, ändern sich Kälteleistung und ζ lediglich um 2 % gegenüber den Nennbedingungen. Die Temperaturvariation von $T_{Wärme}$ von 38 °C auf 44 °C und eine Änderung der Temperaturspreizung von 5 K bis 12 K zeigen ähnlichen Einfluss.

3 Ergebnisse

3.1 Entwickeltes Anlagensystem und Prüfstandsaufbau

Wie bereits erwähnt, ist das innovative Kernstück des Systems der Hochtemperaturdesorber HTD. Er wurde auf der Basis der Brennraumgeometrie eines bestehenden Warmwasserkessels entworfen. Als Brennstoff wurden Holzpellets eingesetzt, wobei Brennraum und Rauchgastrakt insbesondere für den Einsatz von Holzhackschnitzeln geeignet sind.
Die Auslegung als Pool-Desorber mit Naturumlauf ermöglicht eine homogene Verteilung von Temperatur und Lösungskonzentration. Die Berücksichtigung der lösungsseitigen Einflüsse bei der Auslegung des Hochtemperaturdesorber-Wärmetauschers erfolgte auf der Grundlage umfangreicher Untersuchungen und CFD-Simulationen.
Im Bereich der Brennkammer kann ein flächenspezifischer Wärmestrom von bis zu 80 $kW \cdot m^{-2}$ auftreten, der nach Untersuchungen von Riepl [5] aufgrund des sehr guten Wärmeübergangs beim Strömungssieden keine kritischen Wandtemperaturen über 180 °C verursacht. Der Aufbau des Desorbers HTD ähnelt den üblichen Standard-Hackschnitzel- bzw. Pelletkesseln mit Rauchrohren. Angepasst wurden lediglich die Einbauten zur Unterstützung der Naturkonvektion und zur Führung des Kältemitteldampfes sowie der aufgesetzte Hochtemperaturkondensator K_2. Daher konnte der HTD mit den herkömmlichen Methoden und kostengünstigeren Materialien des Kesselherstellers gefertigt werden. Dank des ähnlichen Designs kann der HTD zu vergleichbaren Kosten wie ein handelsüblicher Warmwasserkessel mit gleicher Feuerungsleistung hergestellt werden.



(1) Direkt mit Holzpellets gefeuerter Desorber HTD

(2) Rohrbündelbasierte Absorptionskälteanlage

(3) Brennstofflager und – Zuführung sowie hochpräzise Wägeeinrichtung

(4) Steuerung und Hydrauliksystem

Bild 2: In die HIL-Laborumgebung integrierter Systemaufbau

Die einstufige Absorptionskälteanlage, ausgeführt als rohrbündelbasierte Einheit, wurde auf den Hochtemperatur-Desorber HTD abgestimmt entworfen und gebaut. Wie in Bild 2 dargestellt, wurde die gesamte Installation der Komponenten in einem Labor aufgebaut. Mit Hilfe eines Hardware-in-the-Loop-Prüfstandes (HIL) wurden realitätsnahe Messungen am bioSHC-System durchgeführt.
Die umfangreiche Messtechnik wurde mit dem Ziel gewählt, die relative Messunsicherheit bei den Effizienzkennzahlen unter 10 % zu halten. Zu diesem Zweck kam neben hochgenauen Ultraschall- und Coriolisdurchflussmessgeräten sowie besonders abgestimmten Temperatursensoren auch eine hochpräzise Waage zur Ermittlung des Brennstoffmassenstroms zum Einsatz. Die Massenabnahme in einem von der Umgebung entkoppelten Behälter wurde mit einer Genauigkeit von 1 g erfasst.

3.2 Versuchsergebnisse aus dem einstufigen Betrieb (Single-Effect)

Da sowohl die Hochtemperaturstufe als auch die für das mehrstufige System notwendige, einstufige Absorbereinheit im Projekt „BioWap“ zu großen Teilen vollständig neu designt wurden, werden hier die Betriebsergebnisse des einstufigen Systems dargestellt. Dies hilft dabei die im zweistufigen Betrieb erzielten Ergebnisse einordnen zu können, da die Single-Effect-Einheit wesentlichen Einfluss auf das Gesamtergebnis hinsichtlich Effizienz und Leistungsfähigkeit hat.
Bild 3 zeigt das gerenderte 3D-CAD-Modell der Single-Effect-Rohrbündeleinheit sowie ein Nomogramm zum einfachen Ablesen der Leistungsdaten. Das Kennfeld wurde auf Basis von umfangreicher Vermessung im Single-Effect-Betrieb und mit Hilfe der Methode der charakteristischen Gleichung erstellt.

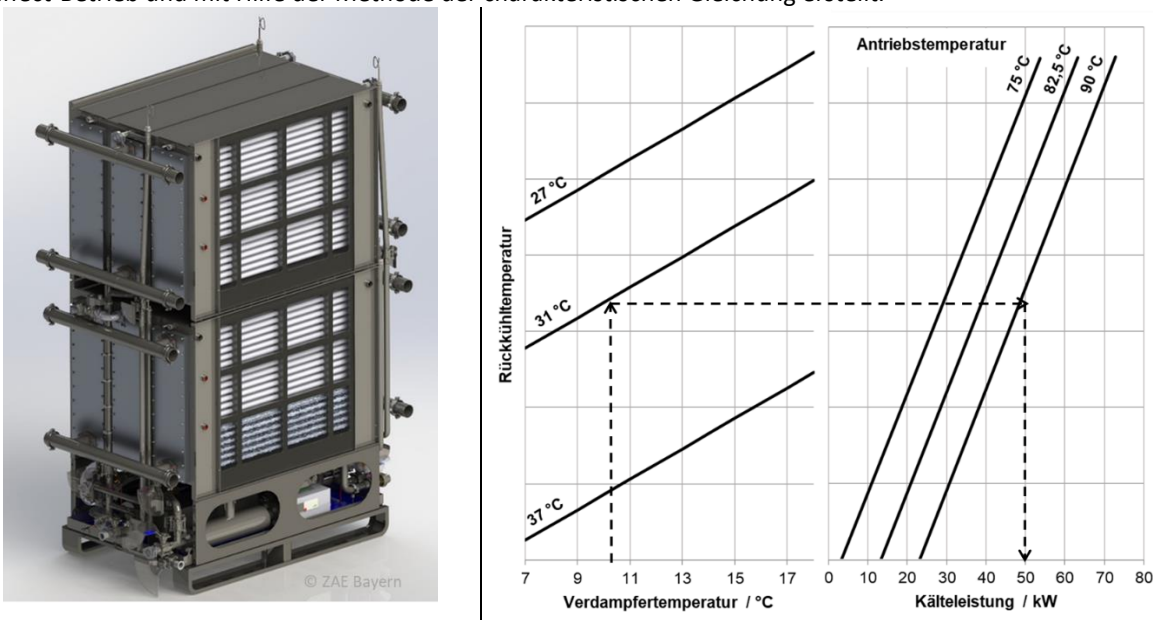


Bild 3: 3D-CAD-Modell der Rohrbündeleinheit sowie Nomogramm der Single-Effect-Einheit

Das Wärmeverhältnis, hier als Quotient aus Kälteleistung im Verdampfer V_1 und Antriebsleistung im Desorber D_1, erreichte im Single-Effect-Betrieb Werte im Mittel von $\zeta_{Cold,SE} \approx 0{,}74$ und liegt damit bei marktüblichen Werten.
Durch die Ausführung mit Grundabmaßen einer Europalette sowie Türgängigkeit ist die Anlage kompakt und gut in Betriebsräume eingbringbar. Zudem ist das Gesamtgewicht durch Konstruktionsoptimierung als Dünnblech-Laserschweißgeometrie niedrig.
Große Schaugläser bzw. Seitenscheiben ermöglichten im Betrieb eine gute Beurteilung und Optimierung der Benetzung der in rostfreiem Stahl ausgeführten Rohrbündel. Zudem konnte der Einfluss von Additiven beobachtet, sowie Auswirkungen des für den HTD verwendeten niedrig legierten Stahls auf den Kaltwassersatz untersucht und als unkritisch beurteilt werden. Damit ist diese Anlagenkomponente bestens abgestimmt und funktionsfähig im Betrieb mit Hochtemperaturdesorbern.

3.3 Versuchsergebnisse aus dem zweistufigen Betrieb (Double-Effect bzw. Double-Lift)

Die Messungen am bioSHC-System im zweistufigen Betrieb zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den simulierten Prozessparametern. Beim Vergleich von Tabelle 1 mit Tabelle 2 fällt lediglich auf, dass die Wärme- und Kälteleistung sowie die Brennstoffeffizienz um 10-15 % geringer als erwartet sind. Dies liegt an den hohen Wärmeverlusten des HTD an die Umgebung, welche aufgrund der messtechnischen Ausstattung für wissenschaftliche Zwecke wesentlich größer ausfallen. In den Laborversuchen des Double-Effect-Betriebs konnte ein brennstoffbezogener Wirkungsgrad für die Wärmebereitstellung von $BUE_{Heat} = 1{,}7$ nachgewiesen werden. Das Wärmeverhältnis erreichte einen sehr guten Wert von $\zeta_{Heat,DE} = 2{,}21$. Weitere Daten aus Messungen einschließlich der absoluten Unsicherheiten (bezogen auf eine 1-σ-Wahrscheinlichkeit) sind in Tabelle 2 angegeben. Hervorzuheben ist der geringe elektrische Energiebedarf von etwa 1 % der nutzbaren Wärme $\dot{Q}_{Wärme}$. Die Emissionen (Staub, CO) konnten geringgehalten werden und betrugen bei gleicher Wärmeleistung nur etwa 54 % der Emissionen konventioneller Systeme.

Tabelle 2: Ergebnisse und Unsicherheiten der Messungen am bioSHC-System bei Nennbedingungen

Kennzahl	Einheit	Double-Effect	Unsicherheit (abs.)	Double-Lift	Unsicherheit (abs.)
$T_{Kälte}$	°C	5,6 | 9,0	±0,10	5,7 | 8,0	±0,10
$T_{Wärme}$	°C	39,9 | 31,3	±0,19	90,2 | 80,0	±0,3
T_{Hub}	K	34,4	±0,19	84,5	±0,3
$\dot{Q}_{Wärme}$ | $\dot{Q}_{Kälte}$	kW	95,7 | 52,3	±3,9 | ±2,1	57,9 | 13,2	±2,6 | ±1,5
ζ_{Heat} | ζ_{Cold}	-	2,21 | 1,21	±0,12 | ±0,01	1,30 | 0,30	±0,03 | ±0,02
BUE_{Heat} | BUE_{Cold}	-	1,70 | 0,93	±0,07 | ±0,04	1,03 | 0,23	±0,05 | ±0,01

Das System hat Optimierungspotenzial hinsichtlich des Brennstoffwirkungsgrads. Durch den Verzicht auf alle für wissenschaftliche Zwecke erforderlichen Einbauten, Sensoren und Aktoren, die für den rein funktionalen Betrieb nicht erforderlich sind, könnten die thermischen Verluste enorm reduziert werden. In Kombination mit einer verbesserten Verbrennungsregelung könnten beispielsweise im Double-Effect-Betrieb weitere 15 % an zusätzlicher Heizleistung bereitgestellt werden, da mehr Wärme zum Systemantrieb zur Verfügung stünde.
Die Leistungsfähigkeit des Systems für die kältegeführte Betriebsweise ist in Bild 4 verdeutlicht. Es werden sehr gute Werte sowohl bei der Brennstoffeffizienz als auch beim Wärmeverhältnis erreicht. Für die Kältebereitstellung konnte ein brennstoffbezogener Wirkungsgrad von BUE_{Cold} = 1,0 nachgewiesen werden. Das auf die Nutzkälte bezogene Wärmeverhältnis erreichte einen sehr guten Wert von ζ_{Cold} = 1,24.

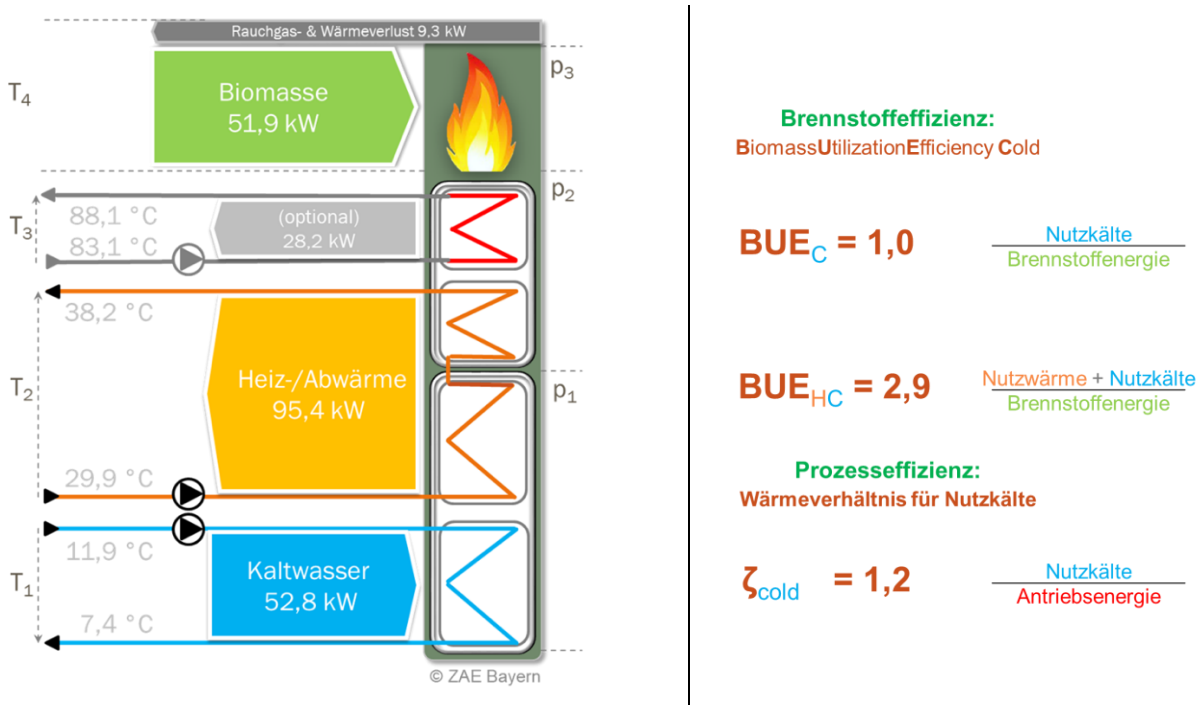


Bild 4: Messergebnisse aus dem DE-Betrieb bei üblichen externen Temperaturbedingungen

3.4 Einschätzung der ökonomischen Perspektive

Um den Marktbedarf eines mit Biomasse betriebenen Wärmepumpen- und Kälteanlagensystems evaluieren zu können, müssen vor allem Anwendungen bei unterschiedlichen Kundengruppen bekannt sein. Im Bereich der Privatkunden steht zunächst die Anwendung „Heizen“ im Vordergrund. Das System wird hier durch den geringeren Brennstoffbedarf attraktiv. So wären private Mikrowärmenetze denkbar aber auch der Einsatz in Altbauten mit erhöhtem Heizbedarf.
Durch die zusätzliche Bereitstellung von Kälte passt das System optimal in den Bereich Hotellerie oder Industriebetriebe. Hier besteht ganzjährig Bedarf an Klima- oder Prozesskälte und Komfort- bzw. Prozesswärme.
Zusätzlich ist die Anwendung im Bereich Nahrungsmittelproduktion, etwa Zuchtbetriebe wie Schweinemasten und Hühnerzuchten zu nennen. Auch Krankenhäuser, Kliniken, Kurzentren, kommunale Gebäude oder sogar Rechenzentren erfüllen die gegebenen Randbedingungen.
Die vielfältigen Anwendungs- und Systemkombinationsmöglichkeiten erschweren eine pauschale Aussage, da das entwickelte Absorptionswärmepumpensystem hinsichtlich der möglichen Temperatur- und Betriebsmodikombinationen sehr frei integrierbar ist. In jedem Falle sollte eine hohe Auslastung im Sinne der Vollaststunden erreicht werden, solange keine weiteren Faktoren wie CO2-Preis oder Energiespeichersubstitution mit einbezogen werden können - wenngleich bisherige Kostenanalysen eher konservativ bzw. hochpreisig angesetzt wurden.
Ein besonders wichtiger Faktor für den Markt innovativer Heiz- und Kühlsysteme sind staatliche Förderungen zum Ausbau erneuerbarer Energien. In der Vergangenheit haben sich einerseits der Energiepreis und andererseits Förderprogramme zum Heizungstausch enorm auf Absatzzahlen von biomassegefeuerten Anlagen ausgewirkt. Die (energie-)politische Situation als auch die schwer kalkulierbare Entwicklung im Biomassemarkt bringt große Unsicherheiten in der Betrachtung des Marktes wie auch bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit sich.
Die Absatzzahlen von Biomassekesseln stiegen in Deutschland in den Jahren 2020 bis 2022 nach mehreren Jahren der Stagnation wieder an, da eine sehr gute Förderung für innovative, erneuerbare, mit Biomasse betriebene Heizanlagen umgesetzt wurde. Gleichzeitig stiegen und steigen die Restriktionen hinsichtlich der Emissionen, während der Preis für fossile Energieträger als größter Konkurrent für Biomassesysteme im Jahr 2020 zunächst stark gesunken ist, gegen Ende des Jahres 2021 enorm anstieg und sich aufgrund der enormen Verwerfungen im Energiemarkt bedingt durch den russischen Angriff auf die Ukraine bis Ende 2022 vervielfacht hat.
Die seit Januar 2021 neue Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) ist insofern ein wichtiger Schritt zur Energiewende im Gebäudesektor und zur Stabilisierung des Energiemarktes.
Zukünftig ist davon auszugehen, dass der Markt für kombinierte, „multivalente“ Heizsysteme größer wird. Es bilden sich zunehmend Initiativen, die Wärme- und Kältenetze mit vielen kleineren Verbrauchern und Erzeugern kombinieren und damit die Flexibilität aber auch die Versorgungssicherheit steigern. Solche resiliente, regionale Versorgungsnetze müssen zukünftig die Strategie von redundanten Systemen ersetzen, damit die Energiewende gelingen kann. In diesem Sinne sind einerseits staatliche Förderungen zu forcieren, andererseits derzeit noch nicht für eine Marktbewertung zu berücksichtigen.
Gleichzeitig ist aufgrund der Restriktionen hinsichtlich klimaschädlicher Kältemittel der Bedarf an GWP-armen Systemen gestiegen. Das natürliche Kältemittel „Wasser“ ist diesbezüglich ein zu beachtender Faktor.
Durch die Leistungsklasse des Systems ist der höhere Installations- und Anlagenaufwand bereits gerechtfertigt. Gleiches gilt auch für die Integration in Wärmenetze. Das bioSHC-System ist damit eher dem Markt der Großwärmepumpen zuzuordnen.
Hinsichtlich des Brennstoffes sind Holzpellets für das bioSHC-System ökonomisch konkurrenzfähiger als Hackschnitzel, da sich bei Pellets die Brennstoffeinsparung stärker auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt. Holzhackschnitzel werden jedoch von mehr Kunden im angestrebten Leistungsbereich genutzt.
Hervorzuheben ist, dass die höhere Effizienz durch Wärmepumpentechnologie das Potenzial für Biomassesysteme nennenswert erweitern kann, damit also regional diesen Markt durchaus insgesamt vergrößern könnte. Zudem ist die Nutzung des bioSHC-Systems für die hocheffiziente hackschnitzelgefeuerte Kühlung hervorzuheben. Hier könnte sich ein Markt für die ökonomisch konkurrenzfähige Bereitstellung von Kälte für das System ergeben – insbesondere da es unempfindlich gegenüber schwankendem Strom- oder Gasangebot ist.
Da es sich hier um ein neuartiges Produkt handelt, ist derzeit nur schwer abzuschätzen inwieweit Absatzzahlen von Pellet- und Hackschnitzelkesseln für das System aus „BioWap“ bzw. für das bioSHC relevant sind. Aufgrund der signifikant höheren Effizienz im gegebenen Leistungsbereich wird zum Teil auch ein neuer Markt geschaffen. Es muss daher zunächst eine Evaluierung des Kundenwunsches stattfinden, das entwickelte System also potentiellen Abnehmern vorgestellt werden, um das Interesse und die Akzeptanz abzufragen. Mit den in diesem Forschungsvorhaben erarbeiteten Ergebnissen ist dies nun prinzipiell möglich

Grundsätzlich ist der Markt für das bioSHC-System zukünftig positiv zu bewerten, da

- Die Investitionskosten für das mehrstufige System ähnliches Niveau erreichen, wie die konventionelle Kombination aus AKM und Heizkessel – bei wesentlich höherer Effizienz des bioSHC-Systems
- der Absatz an Holz- bzw. Pelletfeuerungen ebenso wie der Anteil von Wärmepumpen am Heizungsmarkt derzeit steigt,
- Verwerfungen am Energiemarkt aufgrund der politischen Lage in Europa längerfristig zu hohen Preisen bei Energieträgern führen,
- innovative Wärme- und Kältenetze insbesondere für Neubauten gefördert und forciert werden,
- der anstehende Austausch alter Heizsysteme mit neuen, erneuerbaren Systemen in den kommenden Jahren zusätzlich steigende Absatzzahlen bei Biomassefeuerungen erwarten lässt.

Eine finale Bewertung im Sinne einer Prognose der Absatzzahlen für das hier vorgestellte System ist jedoch noch nicht seriös möglich. Es muss vielmehr auf einen weiteren Forschungsbedarf hingewiesen werden. Dies gilt einerseits für die technischen Optimierungspotenziale, aber auch hinsichtlich einer Marktanalyse und der Anpassung und Verschlankung des Systems zum Produkt „bioSHC“ auf den Kundenbedarf.

4 Fazit und Ausblick

Die Projektpartner ZAE Bayern und HDG Bavaria konnten die regenerative und versorgungssichere Kälteerzeugung mit dem sehr hohen Brennstoffausnutzungsgrad von 1 nachweisen – Verhältnis von „Kälte zu Holz“ = 1:1“. Mit den Versuchen am Labor-Funktionsmuster ist das Proof-Of-Concept gelungen. Das vom BMWK geförderte Verbundvorhaben „BioWap“ (Förderkennzeichen 03KB127) wurde mit dem Abschluss der vielversprechenden Labormessungen erfolgreich beendet.
Durch das attraktive Temperaturniveau der Kälte bei 4 bis 15 °C bei gleichzeitig hohen Rückkühltemperaturen um 40 °C können mit dem Absorptionskälteanlagensystem Verbraucher mit etwa 55 kW Kälteleistung zuverlässig und - durch die Holzhackschnitzel- oder Pelletfeuerung - nahezu unabhängig von volatilen Stromerzeugern versorgt werden.
Der modulare Aufbau der drei Hauptkomponenten ermöglicht die Umschaltung zwischen verschiedenen Betriebsmodi mit Fokus auf Kühlen, Heizen oder beides gleichzeitig. Dadurch wird eine hohe Biomasse-Nutzungseffizienz und/oder ein hoher Temperaturhub für alleiniges oder gleichzeitiges Heizen und Kühlen erreicht.
Der insgesamt sehr geringe Stromverbrauch entlastet zudem die Stromnetze. Die gewählten Auslegungstemperaturen entsprechen den Anforderungen des Neubaustandards, sind aber auch für Altbauten geeignet. Dies ermöglicht perspektivisch zahlreiche Anwendungen in realen Gebäuden oder industriellen Prozessen.

Die Klimatisierungsmöglichkeiten, etwa Heizen, Kühlen oder beides, sowie auch die zugehörigen Temperaturniveaus und Brennstoffarten müssen nun für eine anwenderfreundliche Weiterentwicklung vorab geklärt werden. Entsprechend wird derzeit eine umfassende Markt- und Kundenanalyse erarbeitet. Anwender, Kunden als auch Installateure im Umfeld der Forschungsakteure sollen angesprochen werden um ein kompaktes, robustes und zuverlässiges System spezifizieren zu können.
Aus Sicht der Forschenden muss auf Grundlage dieser Ergebnisse ein weiteres, vereinfachtes Funktionsmuster erarbeitet werden. Dieses soll als Feldtestanlage bei interessierten Kunden installiert werden, um im Dialog mit diesen Anwendern die Praxistauglichkeit nachzuweisen. Dies soll möglichst im Rahmen eines wissenschaftlich begleiteten Folgeprojektes stattfinden, sodass alle wichtigen Fragestellungen, wie etwa der Standfestigkeit im Dauerbetrieb oder der realen Jahresarbeitszahl hinlänglich beantwortet werden können. Der nötige Forschungszeitraum wird auf mindestens 3 Jahre geschätzt. Der Zeitpunkt der Marktreife hängt dementsprechend auch von den Ergebnissen der Feldtests ab. Die Kosten eines solchen Systems dürften, je nach Stückzahlen und Anwendungsfeld, letztlich auf demselben Niveau bereits heute verfügbarer biomassebetriebener Absorptionskältesysteme liegen – jedoch bei enorm verbesserter Brennstoffausnutzung.
Davon unabhängig sollen die am ZAE Bayern entwickelten Absorptionswärmepumpen- und Kälteanlagensysteme nun durch ein ausgegründetes Unternehmen vermarktet werden. Die neu gegründete eQrima Energy Solutions GmbH hat sich zum Ziel gesetzt, die Effizienzvorteile der untersuchten Konzepte im Markt zu etablieren. Die hierfür eingesetzte Basisstufe eignet sich besonders für mehrstufige Anwendungen – also auch für das hier vorgestellte biomassebetriebene Kühlsystem.

5 Danksagung

Dieses Forschungsprojekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK, FKZ 03KB127) gefördert. Wir danken auch der HDG Bavaria GmbH für die zusätzliche finanzielle Unterstützung. Die Autoren bedanken sich außerdem bei den Kolleg:innen der HDG Bavaria GmbH, insbesondere bei Wolfgang Aich, der uns jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand.

6 Literaturverzeichnis

[1] Pelkmans, L.: Germany – 2018 update, Bioenergy policies and status implementation. Country Reports. IEA Bioenergy: 09 2018, p. 8

[2] AG Energiebilanzen e.V., „Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland“, 2020

[3] Sipilä, K. Reda, F. Pasonen, R. Löf, A. Viot, M. Pischow, K. Helm, M. Möckl, M. Menhart, F. Kausche, M. Osgyan, P. Streib, G.: Solar heating and cooling in Northern and Central Europe. VTT Technology 287. ISBN 978-951-38-8510-6. VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, Finland, 2017, pp. 69 - 77.

[4] Ziegler, F.: Sorptionswärmepumpen. Forschungsberichte des Deutschen Kälte und Klimatechnischen Vereins, 1997 (Nr. 57). ISBN 978-3-932715-60-0, 1997, pp. 7, 16, 209

[5] Riepl, M. (2020): Heat Transfer and Flow Characteristics in Thermosiphon Generators of Multi-Stage LiBr/Water-Absorption Heat Pumps. ISHPC 2021 proceedings – online pre-conference 2020, DOI: 10.14279/depositonce-10430.2, Berlin, 2020, pp.119-123.