

Hochtemperatur-Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln

Fallstudien zur HTWP-Integration für industrielle Kälte- und Prozessheißwasserherstellung

Christian Schlemminger^{1*}, Marcel U. Ahrens^{2*}, Sverre Foslie¹, Ole Marius Moen¹,
Michael Bantle¹, Armin Hafner², Sigmund Jenssen³

¹ SINTEF Energy Research, Sem Sælands vei 11, 7465 Trondheim, Norwegen

Christian.Schlemminger@sintef.no

² Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Department of Energy and Process Engineering, Kolbjørn Hejes vei 1B, 7491 Trondheim, Norwegen

Marcel.u.ahrens@ntnu.no

³ Cadio AS, Terminalen 6, 7080 Heimdal, Norwegen

*Korrespondenzautoren

Kurzfassung

Thermische Prozesse in der Nahrungsmittelindustrie, wie z. B. Molkereien sind oftmals eine Kombination aus Erwärmung und Abkühlung eines Produktes. Prozesskühlung wird dabei meistens mittels einer Wärmepumpe erzielt, wobei Prozesswärme häufig konventionell durch die Nutzung fossiler Energieträger erzeugt wird. Integrierte Wärmepumpensysteme zur kombinierten Bereitstellung von Prozesskühlung und -wärme haben aufgrund der erzielbaren Energie- und Emissionseinsparungen gerade vor dem Hintergrund des Pariser Klimavertrags ein hohes Marktpotential.

Diese Arbeit untersucht zwei Fallbeispiele zur Integration von Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTWP):

Im ersten Fallbeispiel wird die Integration und der Test einer neu entwickelten industriellen HTWP zur Nachrüstung in einer existierenden Molkerei präsentiert. Es kommen die natürlichen Kältemittel Propan (R290) und Butan (R600) in einer Kaskade zum Einsatz. Zur Prozesskühlung wird an der Wärmequelle Eiswasser mit 0,5 °C geliefert und an der Wärmesenke Heißwasser mit 115 °C. Die Kaskade liefert 282 kW_{th} mit einer kombinierten Leistungszahl von 3,4 ± 0,3. Der kombinierte Carnot-Gütegrad beträgt circa 0,55.

Im zweiten Fallbeispiel wird der Anlagenbetrieb einer neu gebauten und voll integrierten Molkerei analysiert, wobei der gesamte Prozessbedarf von Wärmepumpen gedeckt wird. Hierzu wird eine Kombination aus NH₃-Kaltwassersätzen (2400 kW_{th}, -1,5 °C / 40 °C), NH₃-Wärmepumpen (1577 kW_{th}, 20 °C / 67 °C) und NH₃-H₂O Hybridwärmepumpe (940 kW_{th}, 60 °C / 95 °C) verwendet. Zur Entkopplung der Wärmequellen und -senken wurden thermische Energiespeicher eingesetzt. Die ermittelten Leistungszahlen der Anlagen sind 4,2, 5,3 und 5,9, was kombinierte Carnot-Gütegrade von 0,55, 0,65 und 0,53 ergibt.

Die untersuchten Fallbeispiele zeigen, dass es technisch möglich ist, durch den Einsatz von HTWP mit natürlichen Kältemitteln die Treibhausgasemissionen bis zu 95% und den Primärenergieverbrauch bis zu 67% zu verringern.

Stichwörter:

Propan-Butan-Kaskade, Hybridwärmepumpe, Hochtemperaturwärmepumpe, Eiswasser, Heißwasser, Industrielle Anwendung, Natürliche Kältemittel

1 Einleitung

Der Klimawandel ist eines der wichtigsten Themen der modernen Gesellschaft. Der Energiebedarf und damit die Treibhausgasemissionen industrieller Prozesse steigen kontinuierlich an, mit einem klaren Trend für die kommenden Jahre [1]. Um umweltfreundliche, kostengünstige und nachhaltige Energiesysteme zu erreichen, wird heute weltweit anerkannt, dass es notwendig ist, die Energieeffizienz industrieller Prozesse zu erhöhen und die direkten Treibhausgasemissionen, z. B. aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe zu reduzieren [2]. Gleichzeitig stehen große Mengen an geringwertiger Abwärme für die potenzielle Abwärmenutzung in verschiedenen industriellen Prozessen zur Verfügung, die nicht direkt nutzbar sind und daher zumeist ungenutzt bleiben [3]. Aus diesem Grund ist es notwendig, effizientere und umweltfreundlichere Wege zur Bereitstellung von thermischer Energie in Form von nutzbarer Wärme und Kälte für industrielle Anwendungen zu entwickeln.

Im historischen Zusammenhang wurden Wärmepumpen meist für kältetechnische Anwendungen entwickelt und eingesetzt. Die Verwendung zur Bereitstellung von Nutzwärme z. B. für das Heizen von Gebäuden, zur Produktion von Brauchwasser oder die aktive Nutzung der Leistung der Verflüssiger von Kälteanlagen gewann allerdings in den letzten zwei Dekaden zunehmend an Bedeutung hinzu. Für die Bereitstellung von Nutzwärme auf unterschiedlichen prozessrelevanten Temperaturniveaus können industrielle Wärmepumpenanwendungen verfügbare Abwärme auf niedrigem Temperaturniveau nutzen, wodurch folglich der Einsatz an Primärenergie reduziert wird. Insbesondere lebensmittelverarbeitende Prozessanlagen, wie z. B. Molkereien, bieten aufgrund des gleichzeitigen Kühl- und Wärmebedarfs in erreichbaren Temperaturbereichen für derzeit marktreife Wärmepumpenlösungen ein großes Potenzial für den Einsatz von Wärmepumpenlösungen. Der Einsatzbereich von marktreifen Industrierärmepumpen zur Wärmeerzeugung liegt aktuell in dem Temperaturbereich von 30 °C bis 70 °C für die Wärmequellen- und von nicht mehr als 70 °C bis maximal 100 °C für die Wärmesenke [4].

Wärmepumpen mit erreichbaren Temperaturen oberhalb von 100 °C werden in der Literatur als Hochtemperaturwärmepumpen (HTWP) beschrieben und es existieren bislang nur wenige industrielle Anlagen. Vielmehr wurden HTWP mit einem möglichen Temperaturhub von über 100 K bisher kaum erforscht, trotz der vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten bei gleichzeitiger Nutzung der Wärmequellen- und Wärmesenkenseite [5]. Durch die hohen Kondensationstemperaturen ist die Auswahl geeigneter Kältemittel für HTWPs begrenzt. In Hinblick auf die Umweltverträglichkeit ist der Einsatz natürlicher Kältemittel mit geringem Treibhauspotenzial und bekannten Auswirkungen auf die Atmosphäre für den Betrieb von Wärmepumpen- und Kältesystemen von besonderem Interesse, um unerwünschte Nebeneffekte zu vermeiden [2]. Günstige Eigenschaften für den Einsatz bei Kondensationstemperaturen im Bereich von über 100 °C besitzen beispielsweise Wasser (R718), Ammoniak (R717), Pentan (R601) und n-Butan (R600) [6]. Schlemminger et al. [5] haben gezeigt, dass eine Kaskade mit Propan (R290) im Niedertemperaturkreis und R600 im Hochtemperaturkreis vielversprechend.

In der hier vorliegenden Arbeit werden die Möglichkeiten zur Integration von HTWP in industrielle Prozesse anhand von zwei Fallbeispielen für existierende Molkereien untersucht. Im ersten Fallbeispiel wird die Integration und der Test einer neu entwickelten industriellen HTWP zur Nachrüstung einer bestehenden Molkerei präsentiert. Für die HTWP kamen, wie zuvor beschrieben, die natürlichen Kältemittel R290 und R600 in einer Kaskade zum Einsatz, um zukünftige Beschränkungen und Herausforderungen mit synthetischen Kältemitteln zu umgehen. Im zweiten Fallbeispiel wird der Anlagenbetrieb einer neu gebauten und voll integrierten Molkerei analysiert, wobei der gesamte Prozessbedarf von Wärmepumpen gedeckt wird. Im Rahmen der Untersuchungen werden die Leistungsparameter der verwendeten Wärmepumpensysteme sowie die Einsparungspotentiale in Bezug auf Primärenergie und CO₂-Emissionen analysiert und bewertet.

2 Messdatenerfassung und -auswertung

Für die untersuchten Fallbeispiele wurde jeweils der Zeitraum einer vollen Woche analysiert, um produktionsübergreifende Einflüsse zu identifizieren und bei der Auswertung zu berücksichtigen. Bei der Messdatenerfassung wird ein Wert zu einem bestimmten Zeitpunkt nur dann vom Messsystemen protokolliert, wenn er sich innerhalb eines definierten Bereichs vom Wert des vorherigen Zeitschritts unterscheidet. Da die Zeitschritte für die verschiedenen Messungen nicht einheitlich waren, führte die Zusammenführen der protokollierten Werte zu zahlreichen Leerzellen. Um alle Leerzellen zu füllen, wurde eine lineare Interpolation zwischen zwei bekannten Werten durchgeführt. Für die weitere Verwendung wurden die aufgezeichneten Daten neu abgetastet und die Durchschnittswerte auf Minutenbasis berechnet. Die Programmiersprache Python und insbesondere die Datenanalysebibliothek Pandas, sowie die Stoffdatenbibliothek CoolProp-Paket wurde für die Datenerfassung und -

verarbeitung verwendet. Für die Messdatenauswertung und Berechnung der Energiebilanzen wurde Microsoft Excel 2016 erweitert, um die thermo-physikalische Eigenschaften mithilfe der Bibliothek REFPROP 10.0 zu verwenden.

Das Messsystem im ersten Fallbeispiel ermittelt die Temperatur in einem Bereich von -30 °C bis 150 °C mit einer Genauigkeit von ± 1 K (absolut) und $\pm 0,3$ K (relativ). Die Druckmessung erfolgt in einem Bereich von 1 bar bis 30 bar mit einer Genauigkeit von $\pm 0,2\%$ FS BSL. Die Wasservolumenströme der Wärmequelle und -senke werden mit elektromagnetischen Messgeräten mit einer Messunsicherheit von $\pm 1\%$ gemessen. Die elektrische Leistungsaufnahme der Verdichter der HTWP werden an separaten Frequenzumformern gemessen. Unsicherheiten der Leistungsmessung sind mit $\pm 1\%$ zu bewerten. Der Gesamtstromverbrauch des KWS, der transkritischen CO₂-Wärmepumpe und des elektrischen Heizers werden Leistungsmessern mit einer Messunsicherheit von $\pm 0,5\%$ gemessen.

Im Messsystem des zweiten Fallbeispiels wurden die Vor- und Rücklauftemperaturen bei allen Verbrauchern, Wärmepumpensystemen und thermischen Energiespeichern mit PT100-Temperatursensoren (iTHERM TM411, Klasse A, $\pm 0,15 + 0,002 \cdot T$ [°C]) ermittelt. Die Messungen der Volumenströme wurden mit Coriolis (Promass F300 Hart, $\pm 0,1\%$) oder elektromagnetischen Durchflussmessern (Promag H300 ProfiNet, $\pm 0,2\%$) durchgeführt. Die Werte für den Gesamtstromverbrauch und den spezifischen Stromverbrauch der verschiedenen Wärmepumpen sowie des Elektroheizers wurden mit Leistungsmessern (PowerLogic PM3000, $\pm 0,5\%$) ermittelt.

Aus diesen Informationen wurde eine durchschnittliche relative Unsicherheit für jeden Messpunkt ermittelt. Diese Werte wurden dann verwendet, um die kombinierte relative Messunsicherheit der verschiedenen Systemparameter einschließlich aller beitragenden Variablen durch Anwendung der Wurzelsummenmethode zu bestimmen. Benutzte Messwerte sind über 60 Minuten gemittelt. Als Qualitätskontrolle wurde die Standardabweichung der Messwerte berechnet. Die Leistungen von Verdampfer und Verflüssiger der Wärmepumpen werden sekundärseitig direkt gemessen. Die kombinierte Leistungszahl der HTWP bei Nutzung von Wärmequelle und -senke ergibt sich nach Gleichung 1.

$$COP_{WS+WQ} = \frac{\dot{Q}_o + \dot{Q}_c}{P_{el}} \quad (1)$$

Bei der Nutzung der Wärmequelle und -senke ergibt sich die kombinierte Leistungszahl nach Carnot aus Gleichung 2, welche einen idealen Prozess beschreibt.

$$COP_{C_WS+WQ} = \frac{T_{WS} + T_{WQ}}{T_{WS} - T_{WQ}} \quad (2)$$

Hier sind T_{WQ} und T_{WS} die Austrittstemperaturen der Wärmequelle- und senke. Aufgrund der großen Spreizung der Ein- und Austrittstemperatur an der Wärmesenke der transkritischen CO₂-Wärmepumpe wurde hier der Mittelwert zur Berechnung herangezogen. Für die Bewertung der Leistungszahl kann der kombinierte Carnot-Gütekoeffizient herangezogen werden.

$$\eta_{c_WS+WQ} = \frac{COP_{WS+WQ}}{COP_{C_WS+WQ}} \quad (3)$$

Für die Betrachtung der NH₃-Kaltwassersätze wurde in Gleichung 1 nur die Verdampferleistung respektive die Wärmequellentemperatur in Gleichung 2 herangezogen. Für die NH₃-Wärmepumpe und Hybridwärmepumpe wurden in Gleichung 1 die Verflüssigerleistung und in Gleichung 2 die Temperaturen der Wärmesenke zur Analyse genutzt.

3 Fallbeispiel 1 – Systemintegration einer Propan-Butan-Kaskade HTWP

Im ersten Fallbeispiel wird der Anlagenbetrieb eines neu entwickelten industriellen HTWP-Prototyps, welcher in eine existierende Molkerei integriert wurde, analysiert. Die Molkerei hat eine Jahresproduktion von ca. 75 Millionen Litern. Ziel der Systemintegration ist die Bereitstellung von Prozessheißwasser bis zu einem Temperaturniveau von 115 °C. Im hier untersuchten Fall wird gleichzeitig Prozesskühlung in Form von Eiswasser bei 0.5 °C bereitgestellt.

3.1 Vorstellung des Energiesystems der Molkerei

Die vereinfachte Integration der HTWP ist im Bild 1 dargestellt.

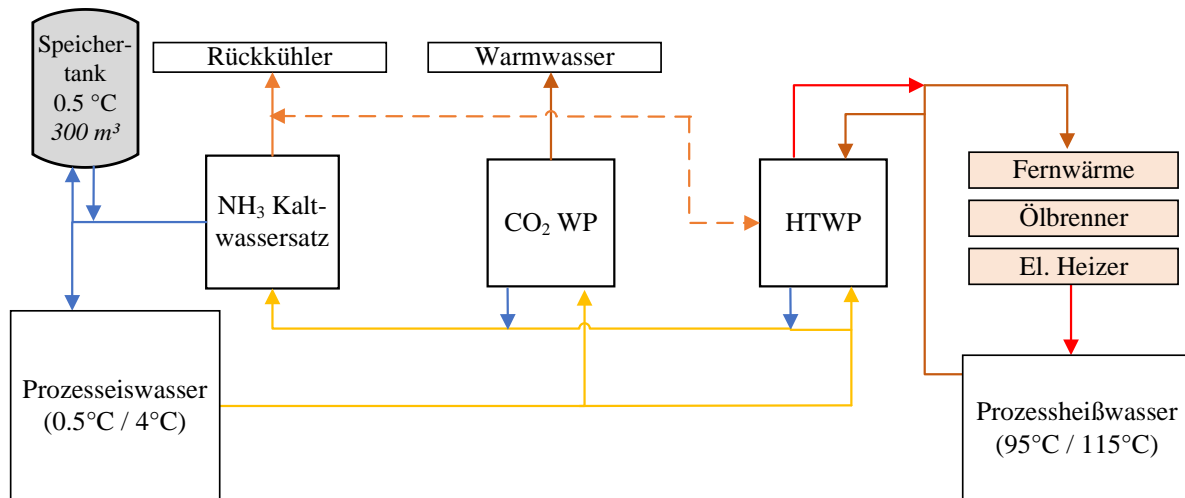


Bild 1: Schematisches Energiesystem der Molkerei mit HTWP Integration

Das Energiesystem der Molkerei besteht aus der Prozesseiswasserversorgung mit einer Vorlauf- und Rücklauf-temperatur von respektive 0,5 °C und 4 °C. Die Bereitstellung der Prozesskälte erfolgt durch: 4 NH₃-KWS (2700 kW_{th}, -1,5 °C / 33 °C) und einer transkritische CO₂-Wärmepumpe zur Warmwasseraufbereitung (160 kW_{th}, 0 °C / 75 °C). Ein 300m³ Eiswasserspeicher wird als Puffern benutzt. Die Prozessheißwasserbereitung erfolgt mittels elektrischen Heizers (3000 kW_{th} 95 °C/115 °C). Ölbrenner und Fernwärme sind als Notfallreserve integriert. Der Volumenstrom des Prozessheißwassers wird lastabhängig geregelt, Vorlauf- und Rücklauf-temperatur sind respektive 115 °C und 95 °C.

Die neu entwickelte HTWP ist in die Rücklaufleitung des Prozesseiswassers sowie auf der Prozessheißwasserseite integriert. Dies sichert bei etwaigem Ausfall der HTWP die Versorgung sicher zu stellen. Verdampferseitig wurde ein Wasser/Glykol Sekundärkreislauf integriert. Der Temperaturhub der HTWP ergibt sich aus der Wärmequellen Austrittstemperatur von -1 °C zur Austrittstemperatur der Wärmesenke von 115 °C. Der Betrieb der HTWP entlastet sowohl die NH₃-KWS als auch den elektrischen Heizer. Das Anlagendesign der HTWP kann auch genutzt werden, um Prozessabwärme z. B. von Kondensatoren der Kaltwassersätze als Wärmequelle zu verwenden, siehe Bild 1.

Die durchgeführte Analyse fokussiert sich auf die neu entwickelte HTWP und beinhaltet die molkereiprozessrelevanten Wärme- und Energieströme. Heizen und Kühlen von Lager und Gebäude werden nicht betrachtet.

3.2 Wärme- und Kältebedarfsanalyse

Wie in Bild 1 schematisch gezeigt sind Prozesseis-, Prozessheiß- und Warmwasser die Wärme-/ Kälte-träger der untersuchten Molkerei. Bild 2 zeigt den zeitlichen Wärme-/ Kältebedarf und deren Temperaturniveaus in einer Sommerwoche dieses Jahres.

Die Verläufe zeigen übergeordneten täglichen Zyklus des Bedarfs, wobei am Wochenende keine Produktion stattfindet. Der Prozessheißwasserverbrauch in der Arbeitswoche variiert zwischen 260 kW und 1565 kW bei einer mittleren Vor- und Rücklauf-temperatur von 110 °C ±3 °C und 96 °C ±10 °C. Der Prozesskältebedarf variiert im gleichen Zeitraum zwischen 100 kW und 1015 kW bei mittleren Vor- und Rücklauf-temperatur von 0,7 °C ±1 °C und 4 °C ±2 °C. Die CO₂-Wärmepumpe deckt mit nahezu konstanten Gaskühlerleistung von 170 kW über ca. 13 Betriebsstunden pro Tag den Warmwasserbedarf. Frischwasser wird von 10 °C ±2 °C auf 75 °C ±2 °C erwärmt. Die Warmwasseraufbereitung ist antizyklisch zum Prozessheißwasserbedarf, da Warmwasser in größten Teilen zum Waschen der Anlage benötigt wird. Ermöglicht wird dies durch einen 6 m³ großen Warmwasserspeicher.

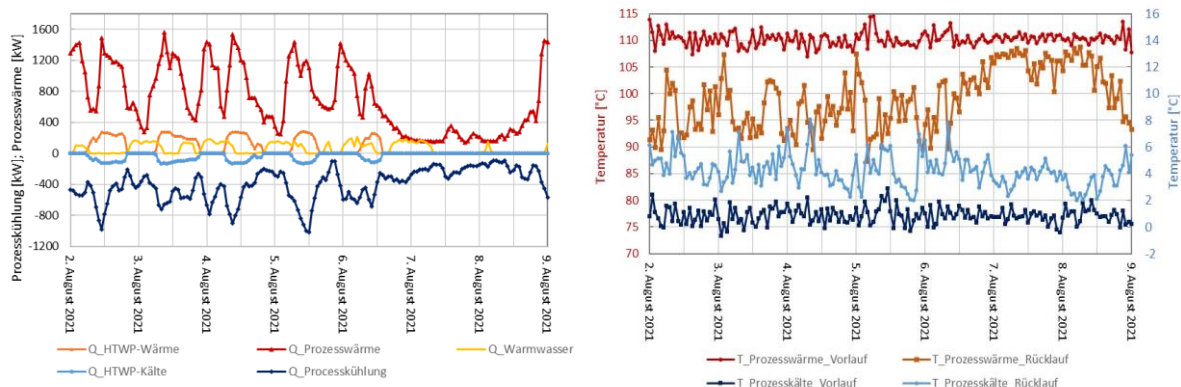


Bild 2: Sommerwoche 2021: links: Wärme- und Kältebedarf, rechts: Temperaturniveaus

Im analysierten Zeitraum von einer Woche betrug die Summe des Prozesswärmebedarfs 117 MWh, des Warmwasserbedarfs 10,7 MWh und der Prozesskältebedarf 77 MWh. Im Zeitraum wurde der Primärenergiebedarf von 126 MWh vollständig mit Strom gedeckt. Die Rückgewinnungsrate der Abwärme betrug 17,6% und teilt sich auf in 9,5 MWh für Warmwasser (CO₂-WP) und 12,8 MWh für Prozessheißwasser (HTWP).

3.3 HTWP Beschreibung und Betriebsanalyse

Um Kondensationstemperatur von ca. 120 °C zu erreichen ist die Auswahl natürlicher Kältemittel für HTWPs begrenzt. Wasser (R718), Ammoniak (R717), Pentan (R601) und n-Butan (R600) haben die günstigsten Eigenschaften [6,8]. Um den Temperaturhub der HTWP von 120 K zu realisieren, kommt eine Kaskadenlösung aus Propan (R290) im Niedertemperaturkreislauf und R600 im Hochtemperaturkreislauf zum Einsatz, siehe Bild 3.

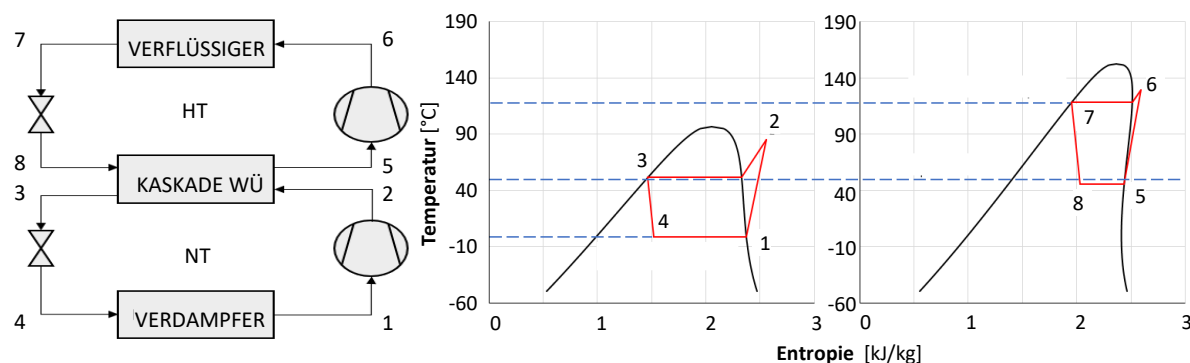


Bild 3: Schematischer Aufbau und vereinfachtes T-s Diagramm der R290-R600-HTWP [5]

Die detaillierte Beschreibung des Anlagenkonzeptes kann Schlemminger et. al. [5] entnommen werden. Die Auslegung der HTWP basiert auf kommerziell erhältlichen Komponenten. Hoch- und Niedertemperaturkreislauf sind identisch aufgebaut und bestehen aus den folgenden Hauptkomponenten: Verdichter, Verflüssiger / Kaskade-Wärmeübertrager, Hochdrucksammler, elektrisch geregeltes Expansionsventil, Verdampfer / Kaskade-Wärmeübertrager und Sauggasüberhitzer. Der R600 Kompressor wurde vom Hersteller speziell an den Betrieb bei hohen Temperaturen angepasst. Im vorliegenden Fall wurden folgende Modifikationen gegenüber eines Standard-Verdichters vorgenommen und installiert: eine außen liegende Gasführung auf der Druckgasseite, ein erweiterter Messbereich bis zu 160 °C des Druckgasthermostats, Auswahl eines geeigneten Schmiermittels für Hochtemperatur-Anwendungen in Kohlenwasserstoffen sowie eine Ölpumpeheizung. Beide halbhermetische Verdichter in Tandembauweise sind zum Einsatz in Zone 2 für Gase der Gruppe IIB nach ATEX 2014/34/EU konzipiert und können mit Frequenzumformern in einem Bereich von 35 Hz – 50 Hz stufenlos betrieben werden.

Dimensionierende Werte der HTWP sind: R600 Kondensatorleistung 300 kW_{th} bei einer Kondensationstemperatur von 118 °C, R290 Verdampferleistung von 150 kW_{th} bei einer Verdampfungstemperatur von -5 °C. Dies ergibt eine kombinierten Leistungszahl von 3. Zwischen Verdampfer und Prozesseiswasser ist ein Wasser-Glykol

Kreislauf installiert. Dieser ermöglicht die einfache Kopplung zum Rückkühlerkreislauf, verhindert Frostgefahr im Winterbetrieb und bildet eine zusätzliche Sicherheitsbarriere im Falle einer Kältemittelleckage. Kondensatorseitig stellt der existierende Kesselheißwasserkreis diese Sicherheitsbarriere dar. Diese Integrationsvariante erhöht den nötigen Temperaturhub der HTWP um ca. 15 K (5 K Verdampfer und 10 K Verflüssiger). Die sekundärseitigen Ein- und Austrittstemperaturen samt der gemessenen Verdampfungs- und Verflüssigungstemperatur sind in Bild 4 dargestellt.

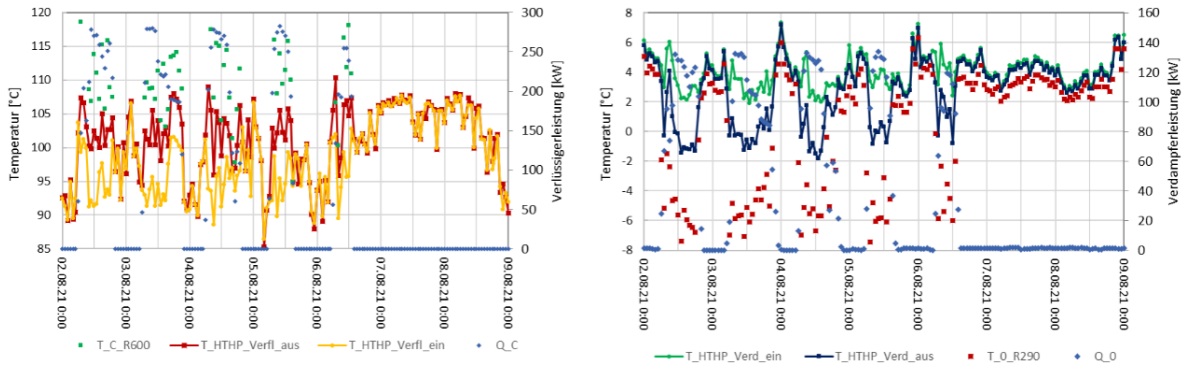


Bild 4: Links: Verflüssiger Temperaturen (R600), rechts: Verdampfer Temperaturen (R290).

Die Variation der Prozessheißwasserrücklaufstemperatur, siehe Bild 2, spiegelt sich in der sekundärseitigen Einlasstemperatur des Verflüssigers wider. Diese bestimmt maßgeblich die R600 Kondensation. Im betrachteten Zeitraum variierte die Kondensationstemperatur zwischen 103 °C bis 119 °C und die Verflüssigerleistung von 80 kW bis 282 kW. Die Verdampfungstemperaturen lagen im Bereich von -7,5 °C bis -2 °C und ermöglichten eine Verdampferleistung von 35 kW bis 134 kW. Der größte gemessene Temperaturhub lag bei 125 K. Werte außerhalb dieser Bereiche werden dem Anlagenstart und -stopperverhalten zugeschrieben. Der Vergleich der Leistungszahl und des Carnot-Gütegrades über den Temperaturhub ist in Bild 5 dargestellt.

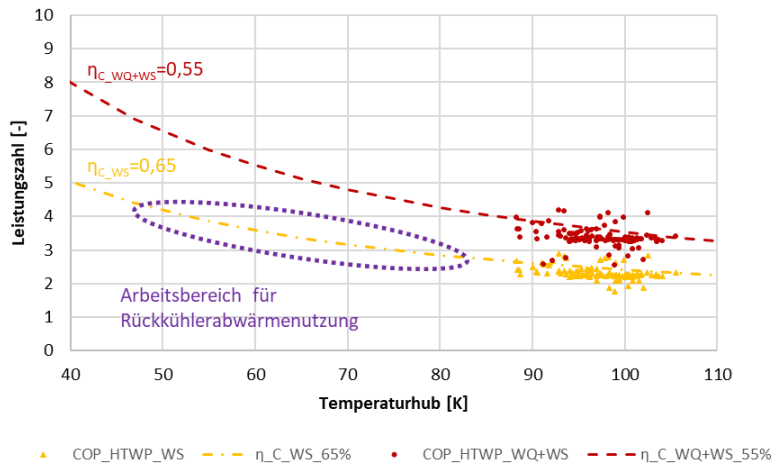


Bild 5: Leistungszahl und Carnot-Wirkungsgrad der R290/R600 HTWP

Die Analyse der kombinierten Leistungszahl ergibt Werte zwischen 2,6 und 4,1 mit einem Mittelwert von 3,4. Der gemessene Temperaturhub über die gemittelten Temperaturdifferenzen für die Wärmequelle- und -senke ergab 88 K bis 108 K, was einem kombinierten Carnot-Gütegrad von 0,54 entspricht. Die Leistungszahl bezogen auf die Verflüssigerleistung erreicht Werte zwischen 1,8 und 2,9 mit einem Mittelwert von 2,5, was in einem Carnot-Gütegrad von 0,64 resultiert. Der zu erwartende Betriebsbereich der HTWP bei Nutzung der Rückkühlerabwärme des NH₃-KWS ist in lila angedeutet, die zu erwartende Leistungszahl liegt zwischen 3 und 4 im Temperaturhubbereich von 50 K bis 80 K.

4 Fallbeispiel 2 – Vollintegriertes Energiesystem einer neugebauten Molkerei

Im zweiten Fallbeispiel wird der Anlagenbetrieb einer neu gebauten und voll integrierten Molkerei vorgestellt, die 2018 in Bergen, Norwegen in Betrieb genommen und 2021 von Ahrens et al. [9] analysiert wurde. Die Molkerei hat eine Größe von 20.000 m² und eine prognostizierte Jahresproduktion von 43,4 Millionen Litern, aufgeteilt in Flüssigmilch (83,1%), Sahne (3,7%) und Saft (13,2%), wobei die Flüssigmilch die Produktion dominiert. Auf dem Dach sind 6.000 m² Photovoltaik-Paneele (PV) installiert, die jährlich etwa 0,5 GWh Strom erzeugen. In dieser Anlage wird der gesamte Prozessbedarf von Wärmepumpen versorgt und zur Entkopplung der Wärmequellen und -senken thermische Energiespeicher eingesetzt. Hierzu wird eine Kombination aus NH₃-Kaltwassersätze (2400 kW_{th}, -1,5 °C / 40 °C), NH₃-Wärmepumpen (1577 kW_{th}, 20 °C / 67 °C) und NH₃-H₂O Hybridwärmepumpe (940 kW_{th}, 60 °C / 95 °C) verwendet.

4.1 Vorstellung des vollintegrierten Energiesystems der untersuchten Molkerei

Die auftretenden Produktionsprozesse in der Molkerei sind auf mehrere Verbraucher mit unterschiedlichen Temperaturniveaus aufgeteilt. Das vollintegrierte Energiesystem nutzt die verfügbare Abwärme der Kühlprozesse als Wärmequelle und wertet diese auf, um nutzbare Prozesswärme für den Heizbedarf zu liefern. Dies ermöglicht die Bereitstellung von Prozesswärme auf verschiedenen Temperaturniveaus von 40 °C, 67 °C und 95 °C. Das voll integrierte Heiz- und Kühlsystem der Molkerei mit einschließlich der drei Wärmepumpensysteme und sechs Temperaturniveaus, die den verschiedenen Prozessverbrauchern zur Verfügung stehen, ist in Bild 6 dargestellt.

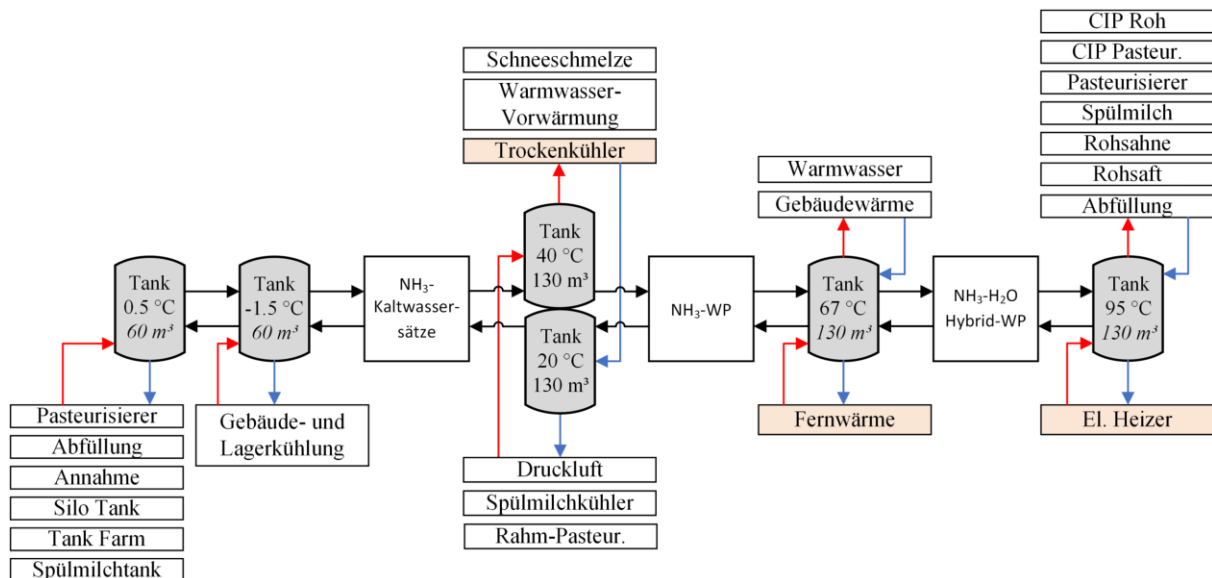


Bild 6: Darstellung des Energiesystems mit Verbrauchern, Wärmepumpen und thermischen Energiespeichern [9]

Die NH₃-Kaltwassersätze liefern Glykol bei einer Temperatur von -1,5 °C für die Bereitstellung der Gebäude- und Lagerkühlung sowie über einen Wärmeübertrager die Versorgung der anderen Kühlprozesse bei 0.5 °C. Über die Verflüssiger liefern die NH₃-Kaltwassersätze 40 °C warmes Wasser, das in einem thermischen Speichertank gesammelt wird. Ausgehend von hier werden verschiedene Prozessverbraucher sowie die Verdampfer der NH₃-Wärmepumpen versorgt. Der Rücklauf wird zur Kühlung weiterer Prozesse in einem weiteren Tank bei circa 20 °C gesammelt. Bei einem Defizit an Kühlung können die Trockenkühler zur Unterstützung verwendet werden.

Zur Bereitstellung der Prozesswärme nutzen die NH₃-Wärmepumpen den 20 °C/40 °C-Kreislauf als Wärmequelle und liefern Warmwasser bei 67 °C für die Gebäudeversorgung sowie zur Nutzung als Wärmequelle für die NH₃-H₂O Hybridwärmepumpe. Eine Kopplung zum Fernwärmenetz kann bei Bedarf bestehende Defizite im 67 °C Tank kompensieren. Die NH₃-H₂O Hybridwärmepumpe verbindet die Funktionsprinzipien einer Absorptions- und Kompressionswärmepumpe und nutzt dabei ein Gemisch aus NH₃ und H₂O als Kältemittel. In der Molkerei fungiert diese als HTWP und versorgt die Verbraucher mit Prozessheißwasser bei 95 °C über einen weiteren thermischen Energiespeicher. Bei Bedarf wird die HTWP durch einen elektrischen Heizer unterstützt, um die notwendige Temperatur zu den Prozessverbrauchern zu gewährleisten.

4.2 System- und Leistungsanalyse

Für die untersuchte Woche im Februar 2020 ergab sich ein Gesamtenergiebedarf für die komplette Molkerei von 325,8 MWh, wobei Heißwasser bei 95 °C mit 22,3% und Warmwasser bei 67 °C mit 17,3% die größten Prozessverbraucher darstellten. Hierbei ergab sich ein Gesamtenergiebedarf von 245.5 MWh, wovon 56,5% mit Elektrizität, 10,8% mit Fernwärme und 32,7% mit der Rückgewinnung von Abwärme von den NH₃-Kaltwassersätzen und Kühlprozessen gedeckt wurden. Der große Anteil an nutzbarer Abwärme innerhalb des Energiesystems sorgt für ein erhebliches Einsparungspotential von Primärenergie bzw. extern bezogener Energie. Die Dimensionierung der Wärmepumpensysteme und thermischen Energiespeicher ist wichtig für den effizienten Betrieb der Anlage und die optimale Versorgung aller Prozessverbraucher. Das Ziel ist dabei, den Ausgleich von produktionsbedingt auftretenden Lastspitzen und zeitlichen Schwankungen zwischen vorhandenem Wärmeangebot und -bedarf sowie von Temperaturunterschieden zu ermöglichen. Bild 7 veranschaulicht die thermischen Stundenlastprofile für die verschiedenen Prozessverbraucher und -versorger über den Zeitraum der untersuchten Woche.

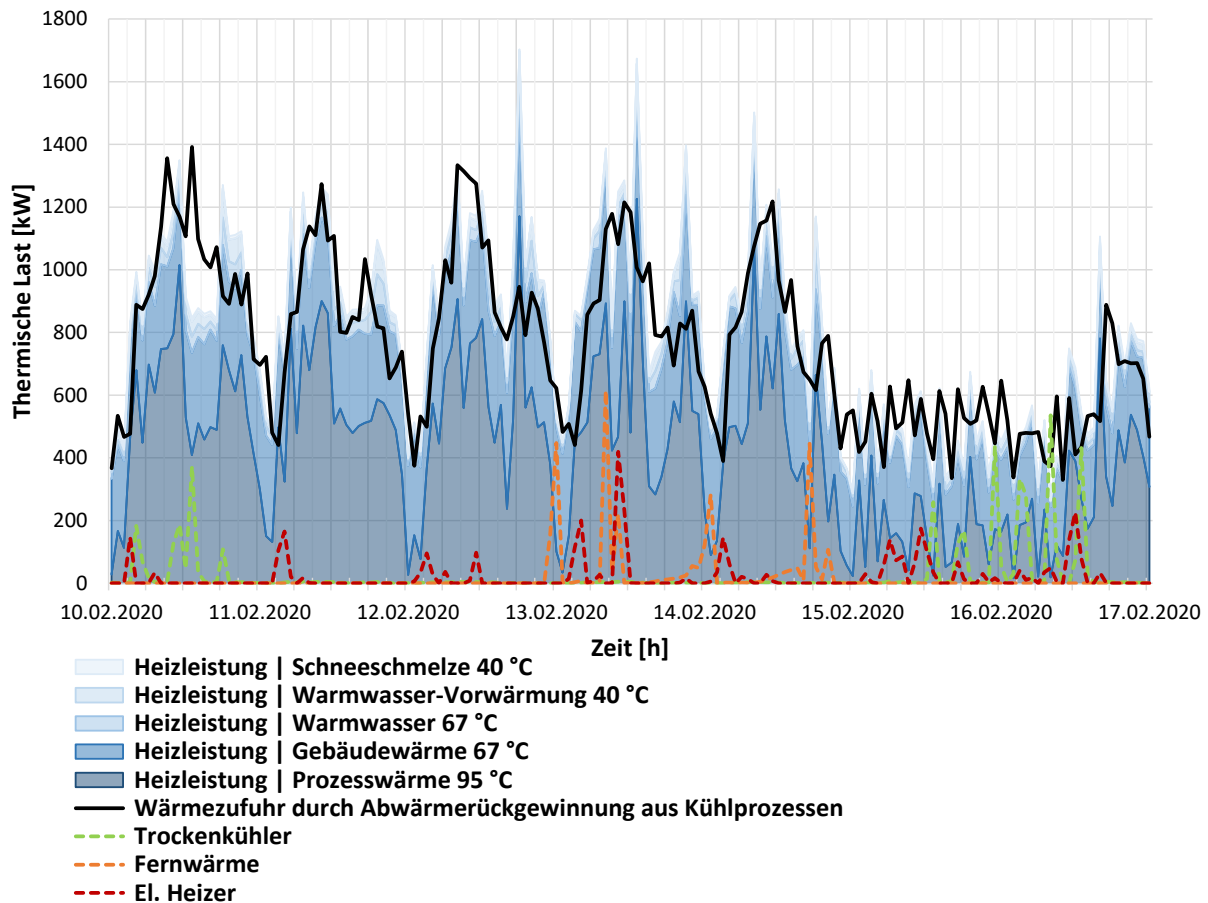


Bild 7: Thermische Stundenlastprofile der verschiedenen Prozessverbraucher und -versorger [9]

Die gestapelte Diagrammfläche stellt die Summe der thermischen Lastprofile für alle Wärmeverbraucher dar, während die durchgezogene Linie die Wärmezufuhr aus der rückgewonnenen Abwärme aus Kühlprozessen, einschließlich der aus dem Strom für die Wärmepumpen erzeugten Wärme, und die verschiedenen gestrichelten Linien die Nutzung der jeweiligen Hilfssysteme darstellen. Die Darstellung veranschaulicht, dass Wärmebedarf und -versorgung die meiste Zeit gut übereinstimmen. Über- und Unterangebote, dargestellt durch die Abweichung der gestapelten Fläche und durchgezogenen Linie, werden größtenteils ohne die Nutzung der Hilfssysteme überbrückt. Dies deutet darauf hin, dass die Wärmespeicher einen angemessenen Ausgleich für das Ungleichgewicht zwischen der benötigten Prozesswärme und der von den Wärmepumpensystemen gelieferten Wärme bieten. Dies resultiert in einer Nutzungsrate von Abwärme für den Produktionsprozess von über 95%. Die ermittelten Leistungszahlen der Wärmepumpensysteme für die untersuchte Woche berechnen sich zu 4,2 für die NH₃-Kaltwassersätze, 5,3 für die NH₃-Wärmepumpen und 5,9 für die NH₃-H₂O Hybridwärmepumpe, was kombinierte Carnot-Gütegrade von 0,55, 0,65 und 0,53 ergibt.

5 Schlussfolgerungen

Die zuvor im Detail diskutierten Energiesystem der untersuchten Molkereien zeichnen sich durch eine hohe Volatilität des thermischen Energieverbrauches aus. Prozesskälte für verschiedene Verbraucher wird in beiden Fällen bei einem Temperaturniveau von $-1,5\text{ °C}$ bis $0,5\text{ °C}$ bereitgestellt. Die Vorlauftemperatur des Prozessheißwassers ist abhängig von den installierten Produktionsanlagen sowie dem Design des Verteilsystems und variiert von 95 °C bis 115 °C . Die Ergebnisse der zwei vorgestellten Fallbeispiele haben gezeigt, dass die Integration von HTWP als Nachrüstung in ein bestehendes System, sowie der Neubau eines Systems ausschließlich basierend auf Wärmepumpen und HTWP mit verfügbarer Technologie erfolgreich umgesetzt werden kann. Im Folgendem erfolgt die vergleichende Leistungsbewertung sowie die Analyse des Energie- und CO_2 -Einsparungspotential der verwendeten Wärmepumpentechnologien.

5.1 Leistungsbewertung

Eine Zusammenfassung der Leistungszahlen der in den Fallbeispielen untersuchten NH_3 -Kaltwassersätzen, NH_3 -Wärmepumpen, transkritischen CO_2 -Wärmepumpen und HTWP ist in Bild 8 gezeigt. Die gezeigten Carnot-Gütegradlinien in Bild 8 sind für eine Wärmequellentemperatur von -2 °C berechnet und ermöglichen den Vergleich zwischen der neu entwickelten R290/R600 Kaskade und den anderen Wärmepumpentechnologien.

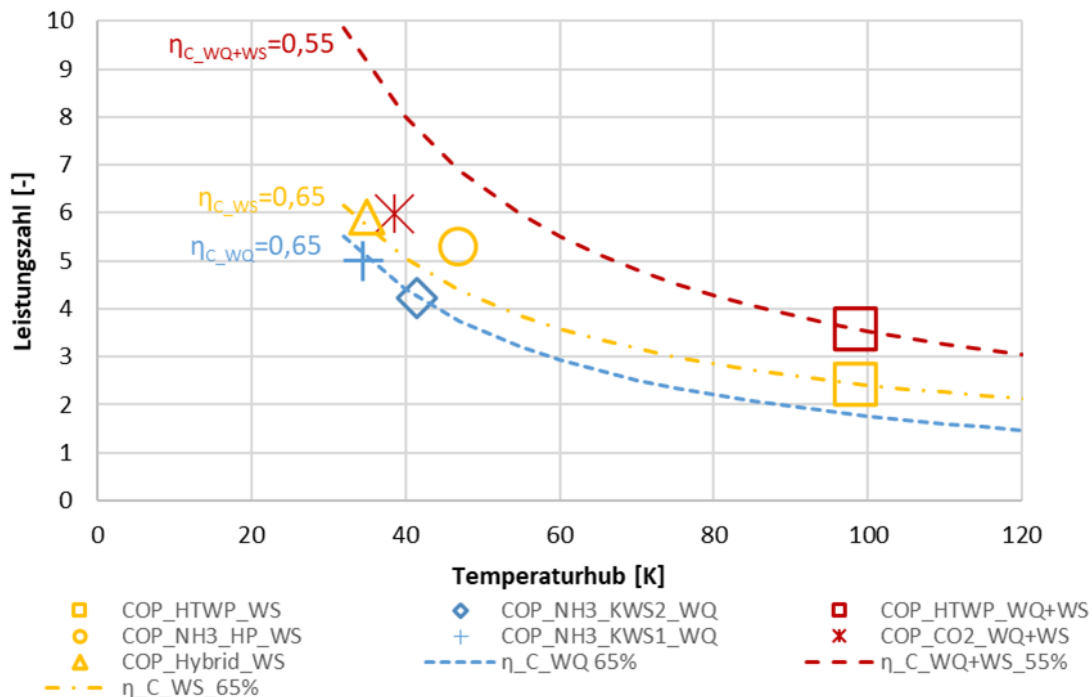


Bild 8: Vergleich der eingesetzten Wärmepumpentechnologien mit natürlichen Kältemitteln

Die beiden analysierten NH_3 -KWS arbeiten mit Temperaturhuben von 35 K bis 42 K und erreichen dabei COP_{wq} von 5,0 und 4,2, was jeweils einen Carnot-Gütegrad für die Wärmequelle von circa 0,64 entspricht. Die NH_3 - H_2O Hybridwärmepumpe erreicht einen Carnot-Gütegrad für die Wärmesenke von circa 0,56 bei einem Temperaturhub von 35 K. Die HTWP (R290/R600 Kaskade) erreicht einen auf die Wärmesenke bezogenen Carnot-Gütegrad von 0,64. Die ermittelten COP_{ws} der beiden Wärmepumpen unterscheiden sich hingegen deutlich mit 5,8 und 2,5, da die HTWP mit 98 K einen vielfach größeren Temperaturhub als die NH_3 - H_2O Hybridwärmepumpe aufweist. Der Carnot-Gütegrad der NH_3 -Wärmepumpe liegt bei 0,73 mit einem COP_{ws} von 5,3 bei einem erzielten Temperaturhub von 47 K. Bezogen auf den kombinierten Wärmequellen und -senke erreicht die HTWP einen Carnot-Gütegrad von 0,54, was einem COP_{wq+ws} von 3,5 entspricht. Der Carnot-Gütegrad für die transkritische CO_2 -Wärmepumpe mit gemittelter Temperatur für die Wärmesenke fällt trotz eines COP_{wq+ws} von 6,0 mit 0,39 niedrig aus, da die auftretende Spreizung mit 65 K verhältnismäßig groß ist. Der normierte Vergleich der Wärmepumpentechnologien macht deutlich, dass die neu entwickelte HTWP mit den anderen Wärmesystem konkurrieren kann.

5.2 Energie- und CO₂-Einsparungspotential der HTWP

Das Einsatzgebiet einer HTWP ist die Wiederaufwertung von Prozessabwärme. Dadurch kann die Nutzung einer Öl- bzw. Gas-befeuerten Heißwassererwärmung umgangen werden. Fallbeispiel 1 zeigt die nachträgliche Integration einer HTWP zur gleichzeitigen Produktion von Eis- und Weißwasser. Fallbeispiel 2 beschreibt eine voll integrierte Wärmepumpenlösung für das gesamte Energiesystem der Molkerei.

Um das Energie- und CO₂-Einsparungspotential zu ermitteln, wurde ein Referenzsystem definiert. Für das Referenzsystem werden die folgenden Annahmen getroffen: Heißwasser-Aufbereitung vom gleichen Temperaturniveau wie die HTWP, Wirkungsgrad des Heißwasserboilers 0,9 und Eiswasserproduktion mit einem COP_{WQ} von 4,5. Die CO₂-Emission für Gas wird mit 180 g CO₂/kWh_{th} und für Elektrizität mit 22 g CO₂/kWh_{el} angenommen (norwegischer Energiemix).

Die Ergebnisse des Vergleichs sind leistungsnormiert auf die Heißwasserproduktion in Tabelle 1 zusammengefasst. Die von der HTWP geleistete Eiswasserproduktion wurde als Randbedingung für die Eiswasserproduktion des Referenzsystems herangezogen.

Tabelle 1 Leistungsnormierter Vergleich zwischen Referenzenergiesystem und der HTWP (Fallbeispiel 1) für kombinierte Eis- und Heißwasserproduktion und dem voll integrierten Wärmepumpenlösung (Fallbeispiel 2)

	Nachrüstung		Neubau	
	Referenz	HTWP	Referenz	KWS+WP+HTWP
Heißwasserproduktion [kW]	1,00	1,00	1,00	1,00
Eiswasserproduktion [kW]	0,53	0,53	0,52	0,52
Elektrische Anschlussleistung [kW]	0,12	0,47	0,12	0,41
Gasbrennerleistung[kW]	1,11	-	1,11	-
Gesamtleistung [kW]	1,23	0,47	1,23	0,41
Primärenergieeinsparung [kWh]		0,76		0,82
Relative Einsparung		62%		65%
CO ₂ -Reduktion		94%		95%

Dieser vereinfachte Vergleich zeigt, dass beide Fallbeispiele ein vergleichbares Einsparungspotenzial besitzen. Das Energieeinsparungspotenzial liegt zwischen 62 % und 67 %. Für 1,00 kWh produziertes Heißwasser und 0,53 kWh produziertes Eiswasser fallen beim Referenzsystem 132 g CO₂/kWh und für die HTWP nur 6,7 g CO₂/kWh an, was einer Reduktion um 95 % entspricht.

Die Analyse von Tabelle 1 zeigt, dass im Fallbeispiel 1 für die Bereitstellung der gesamten Prozesswärme von 117 MWh/Woche mittels HTWP 62 MWh Prozesseiswasser als Wärmequelle zur Verfügung stehen müssen. Dies liegt 15 MWh unter dem gemessenen Verbrauch. Weitere 8,9 MWh werden für die transkritische CO₂-Wärmepumpe benötigt, folglich bleibt ein Restkältebedarf von 5,9 MWh bestehen, welcher mittels Kaltwassersatz gedeckt wird. Die Integration der HTWP kann den Primärenergieverbrauch von 126 MWh/Woche auf 58 MWh/Woche reduzieren. Der bestehende Eiswasserspeicher würde ausreichen, um die Verschiebung zwischen Prozessheiß- und Eiswasserbedarf zu puffern.

Für das Fallbeispiel 2 wird für den gesamten Produktionsprozess 135,7 MWh/Woche Prozesswärme benötigt. Dem gegenüber steht eine benötigte Kältelast von 70,4 MWh/Woche. Das integrierte Energiesystem ist in der Lage, wie in Kapitel 4.2 diskutiert, alle Verbraucher zu versorgen und benötigt hierfür 55,4 MWh/Woche elektrische Energie. Das Referenzsystem benötigt im Vergleich dazu 12,3 MWh/Woche Elektrizität sowie 142,8 MWh/Woche aus der Nutzung des Gasbrenners. Durch die erreichte Effizienzsteigerung für das integrierte Energiesystem können bis zu 67% der Primärenergie sowie 95% der CO₂-Emissionen eingespart werden.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Möglichkeiten zur Integration von HTWP in industrielle Prozesse anhand von zwei Fallbeispielen für existierende Molkereien untersucht. Prozess-, Leistungsparameter sowie die Einsparungspotentiale in Bezug auf Primärenergie und CO₂-Emissionen wurde mit einem konventionellen Referenzsystemen verglichen. Der Einsatz von industriellen HTWP zur Rückgewinnung verfügbarer Abwärme oder der gleichzeitigen Bereitstellung von Prozesskühlung und -wärme ist speziell unter dem Aspekt der verbesserten Energieeffizienz und Einsparungspotential von CO₂-Emissionen interessant. Hierbei zeichnen sich solche Anlagen durch erreichbare Temperaturen der Wärmesenke von über 100 °C bei einem möglichen Temperaturhub von mehr als 60 K aus. Bei vergleichbaren Energiepreisen (€/kWh) für Elektrizität, Öl und Gas ist eine Implementierung von HTWP auch aus ökonomischer Sicht wettbewerbsfähig und besitzt großes Marktpotential. Der Einsatz von natürlichen Kältemitteln bietet zusätzlich Planungssicherheit in Hinblick auf zukünftige Kosten, verursacht durch neue Umweltregularien und damit verbundene Umrüstungen.

Im ersten Fallbeispiel wurde die Integration sowie der Test einer neu entwickelten HTWP als Nachrüstung in einer existierenden Molkerei präsentiert. Für den Einsatz in dem für die Eis- und Heißwasserproduktion typischen Arbeitsbereich von 0 °C bis 120 °C bietet sich die Verwendung von den natürlichen Kältemitteln Propan (R290) und Butan (R600) in einer Kaskade an. Der Vorteil von R290 und R600 als Kaskadenschaltung in einer HTWP sind moderate Betriebsdrücke, ein hoher erreichbarer Temperaturhub, die Verfügbarkeit der Komponenten sowie eine klassische kältetechnische Montage. In der untersuchten HTWP sind bis auf den R600-Verdichterprototyp handelsübliche Standardkomponenten verbaut. Im untersuchten Betrieb liefert die HTWP zur Prozesskühlung an der Wärmequelle Eiswasser mit 0,5 °C und an der Wärmesenke Heißwasser mit 115 °C. Hierbei liefert die Kaskade eine thermische Leistung von 282 kW_{th} mit einer kombinierten Leistungszahl von $3,4 \pm 0,3$ bei einem kombinierten Carnot-Gütegrad von circa 0,54. Mit diesen Leistungswerten ergeben sich Einsparungspotentiale der HTWP gegenüber einer Kombination aus kälteanlagenbasierter Eiswasserproduktion und gasbrennerbasierter Heißwasserproduktion von 62% für den Energieverbrauch und bis zu 94% bei den CO₂-Emissionen. Mit der durchgeführten Untersuchung wurde erfolgreich demonstriert, dass eine gleichzeitige Bereitstellung von Prozesseiswasser und -heißwasser mit einer Wärmepumpe technologisch möglich ist und auch eine Nachrüstung in ein bestehendes Energiesystem ökonomisch und ökologisch sinnvoll umgesetzt werden kann.

Im zweiten Fallbeispiel wurde der Anlagenbetrieb einer neu gebauten und voll integrierten Molkerei präsentiert, wobei der gesamte Bedarf von Prozesskühlung bis -wärme auf verschiedenen Temperaturniveaus von drei Wärmepumpenstufen mit zwischengeschalteten thermischen Energiespeichern versorgt wird. Als HTWP wurde hier eine NH₃-H₂O Hybridwärmepumpe mit dem Potential zur Bereitstellung von Austrittstemperaturen der Wärmesenke von über 100 °C eingesetzt. Durch den Neubau der Anlage konnten die verschiedenen Wärmepumpensysteme optimal aufeinander abgestimmt werden und die maximal benötigte Temperatur für das Prozessheißwasser auf 95 °C reduziert werden. Die Untersuchung des Betriebs im Rahmen der System- und Leistungsanalyse hat gezeigt, dass der Prozessbedarf nahezu vollständig von den Wärmepumpensystem gedeckt wird. Gleichzeitig wurde innerhalb des Produktionsprozesses eine Nutzungsrate der verfügbaren Abwärme von über 95% erreicht. Die Leistungszahlen der Wärmepumpensystem wurden mit 4,2, 5,3 und 5,9 ermittelt, was kombinierte Carnot-Gütegrade von 0,55, 0,65 und 0,53 ergibt. Im Vergleich zu konventionellen Produktionsanlagen mit getrennten Kühl- und Heizkreisläufen sowie dem Einsatz von fossilen Brennstoffen ergeben sich erhebliche Einsparungspotentiale mit bis zu 67% für den Energieverbrauch und bis zu 95% für die CO₂-Emissionen.

Die Untersuchung der vorgestellten Fallbeispiele hat gezeigt, dass der Einsatz von HTWP mit natürlichen Kältemitteln mit verfügbarer Technologie möglich ist und für eine Vielzahl von industriellen Anwendungen aus ökonomischer und ökologischer Sicht sinnvoll umsetzbar sein kann. Hierbei können sowohl durch die Integration in bestehende Systeme als auch beim Einsatz in neugeplante Anlagen erhebliche Einsparungen im Energiebedarf und folglich den freigesetzten Emissionen erzielt werden. Wenngleich zu beachten ist, dass der Einsatz in bestehende Systeme aufgrund der vordefinierten Rahmenbedingungen einen höheren Aufwand bedeuten kann.

7 Danksagung

Diese Publikation wurde von HighEFF - Centre for an Energy Efficient and Competitive Industry for the Future, einem auf acht Jahre angelegten Forschungszentrum im Rahmen des FME-Programmes (Centre for Environment-friendly Energy Research, 257632) finanziert. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch den norwegischen Forschungsrat und die Nutzerpartner von HighEFF. Ein außerordentlicher Dank gilt Herrn Kim Andre Lovas und Tine SA sowie Herrn Bjarne Horntvedt und Herrn Stein Rune Nordtvedt von Hybrid Energy AS für ausführliche Systemdetails und den Zugang zu ihren Systemdaten. Des Weiteren wurde diese Arbeit vom norwegischen Forschungsministerium "The Research Council of Norway" und von den Industriepartnern Skala Farbikk AS, TINE SA, Cadio AS und Dorin S.p.A über das SkaleUP Projekt NFR-296374 finanziert.

8 Nomenklatur

Formelzeichen		Indizes	
COP	Leistungszahl (-)	C	Carnot
HTWP	Hochtemperaturwärmepumpe	c	Verflüssiger
KWS	Kaltwassersatz	el	Elektrisch
P	Antriebsleistung (W)	o	Verdampfer
\dot{Q}	Wärmestrom (W)	R	Kältemittel
T	Temperatur (K)	WS	Wärmesenke
η	Gütegrad (-) oder (W/W)	WQ	Wärmequelle
WP	Wärmepumpe		

9 Literaturverzeichnis

- [1] Conti, J., Holtberg, P., Diefenderfer, J., LaRose, A., Turnure, J.T., Westfall, L., International Energy Outlook 2016 with Projections to 2040, 2016. <https://doi.org/10.2172/1296780>.
- [2] Bamigbetan, O., Eikevik, T.M, Nekså, P., Bantle, M., Review of vapour compression heat pumps for high temperature heating using natural working fluids, Int. J. Refrig. 80 (2017), 197–211. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.04.021>.
- [3] Forman, C., Muritala, I.K., Pardemann, R., Meyer, B., Estimating the global waste heat potential, Renew. Sustain. Energy Rev. 57 (2016), 1568–1579. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.192>.
- [4] Arpagaus, C., Bless, F., Uhlmann, M., Schiffmann, J., Bertsch, S.S., High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials, Energy. 152 (2018), 985–1010. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.166>.
- [5] Schlemminger, C., Bamigbetan, O., Svendsen, E.S., Bantle, M., Design und experimentelle Resultate einer Hochtemperatur-Propan-Butan-Wärmepumpe, in DKV-Tagungsbericht, Aachen, Germany, 21. – 23. November, 2018.
- [6] Bamigbetan, O., Eikevik, T.M, Nekså, P., Bantle, M., Evaluation of natural working fluids for the development of high temperature heat pumps, in 12th IIR Gustav Lorentzen Conf. Nat. Refrig., Edinburgh, United Kingdom, 21. - 24. August, 2016.
- [7] Moffat, R.J., Describing the uncertainties in experimental results, Exp. Therm. Fluid Sci. 1 (1988), 3–17. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(88\)90043-X](https://doi.org/10.1016/0894-1777(88)90043-X).
- [8] Bamigbetan, O., Eikevik, T.M, Nekså, P., Bantle, M., Schlemminger, C., Theoretical analysis of suitable fluids for high temperature heat pumps up to 125 °C heat delivery, Int. J. Refrig. 92 (2018), 185–195. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.05.017>.
- [9] Ahrens, M.U., Foslie, S.S., Moen, O.M., Bantle, M., Eikevik, T.M., Integrated high temperature heat pumps and thermal storage tanks for combined heating and cooling in the industry, Appl. Therm. Eng. 189 (2021), 10. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116731>.