

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

27/03/2017

HOTPUMP RELOADED

843888

e!Mission.at - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	4. Ausschreibung e!Mission.at
Projektstart	01/04/2014
Projektende	31/12/2016
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	33 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Ochsner Wärmepumpen GmbH
AnsprechpartnerIn	DI Karl Ochsner
Postadresse	Krackowitzerstrasse 4, A-4020 Linz
Telefon	+43 (0) 5 04245 - 110
Fax	
E-mail	karl.ochsner@ochsner.at
Website	www.ochsner.at

Hochtemperatur-Wärmepumpen zur energetischen Nutzung industrieller (Niedertemperatur-)Abwärme

HOTPUMP RELOADED

AutorInnen:

Ochsner Wärmepumpen GmbH –

Ochsner Energietechnik GmbH

Ing. Gottfried Adelberger

DI Thomas Ciepiela

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

DI Dr. Veronika Wilk

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
1.1	Aufgabenstellung	6
1.2	Schwerpunkte des Projektes	6
1.3	Einordnung in das Programm	6
1.4	Verwendete Methoden	6
1.5	Aufbau der Arbeit	7
2	Inhaltliche Darstellung	8
2.1	Prozessanalysen	8
2.1.1	Untersuchten Branchen und Prozesse (Auszug)	8
2.1.2	Einbindung der Wärmepumpe in die Prozesse:	10
2.1.3	Ergebnisse der Prozessanalysen:	10
2.1.4	Definition der Auslegungsdaten für die beiden HTWP Funktionsmuster.	11
2.2	Entwicklung und Konstruktion der beiden HTWP Funktionsmuster	12
2.3	Bau der beiden HTWP Funktionsmuster	13
2.4	Test und Vermessung der beiden Funktionsmuster am HTWP Prüfstand	13
2.5	Modellbildung	18
2.5.1	Methode	18
2.5.2	Grey-Box-Modell	18
2.5.3	Detailliertes Modell	20
2.6	Prozesssimulation und techno-ökonomische Bewertung	24
2.6.1	Methode	24
2.6.2	Systemsimulationen mit der einstufigen Wärmepumpe	25
2.6.3	Molkerei Abwärmenutzung	28
2.6.4	Molkerei: Heizen und Kühlen	31
3	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	34
3.1	Einsatzgebiete für Wärmepumpen mit 130°C Senkentemperatur	34
3.2	Beispielanwendungen für 130°C Wärmepumpen in Industrieprozessen:	34
3.3	Prozesssimulation und techno-ökonomische Bewertung	35
3.4	Erfolgreiche Tests der Funktionsmuster mit 130°C Senken Temperatur	35
4	Ausblick und Empfehlungen	36
4.1	Zukünftige Vermarktungsaktivitäten	36
4.2	Weiterführende F&E Aktivitäten	36
4.2.1	Erprobung von Low GWP Kältemittel (GWP nahe 0)	36
4.2.2	Maßnahmen zur weiteren Optimierung des COP	37
4.2.3	Maßnahmen zur Erhöhung der Flexibilität	37
5	Publikationen	37
6	Literaturverzeichnis	37
7	Kontaktdaten	39

e!Mission.at - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

In diesem Projekt wurden Wärmepumpen entwickelt, die Wärme mit bis zu 130°C Nutzungstemperatur liefern können und dabei Wärmequellen im Bereich von 10°C bis 55°C nutzen. Dazu wurden zwei Funktionsmuster konzipiert, die für unterschiedliche Quelltemperaturen geeignet sind. Die Funktionsmuster wurden am Prüfstand betrieben, vermessen und optimiert. Da die Wärmepumpen in Industrieprozessen eingesetzt werden sollen, wurden die Funktionsmuster mit einer Heizleistung von ca. 300 kW ausgelegt, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen.

1.2 Schwerpunkte des Projektes

Einer der Schwerpunkte war die Identifizierung von Prozessen, in denen diese Hochtemperatur-Wärmepumpen eingesetzt werden können. Dazu wurden verschiedene Industrieprozesse analysiert und auf nutzbare Abwärmequellen untersucht. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden die erforderlichen Auslegungsparameter für die beiden Wärmepumpen definiert.

Ein Funktionsmuster verfügt über einen einstufigen Kältekreislauf und nutzt Abwärme im Bereich von 40-60°C. Damit können Prozessströme, die derzeit auf Grund des niedrigen Temperaturniveaus nicht mehr in Wärmetauschern genutzt werden können, nutzbar gemacht werden.

Das zweite Funktionsmuster hat einen zweistufigen Kältekreislauf und wurde für hohe Temperaturhübe ausgelegt. Daher ist es für Quelltemperaturen von 10°C bis 20°C gut geeignet. Bei diesem Einsatz geht es neben der Nutzung der Abwärme auch um Kühlanwendungen. Durch gleichzeitiges Heizen und Kühlen ist die Anwendung einer Wärmepumpe besonders effizient.

1.3 Einordnung in das Programm

Das Projekt behandelt prioritär das Themenfeld Energieeffizienz und Energieeinsparung und dabei im Besonderen Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe. Prozessenergie, welche mit Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTWP) verfügbar gemacht werden kann, stellt vor allem für Industrieunternehmen mit energieintensiven thermischen Prozessen eine interessante Kosteneinsparung dar, da dadurch bisher ungenutzte Abwärme wieder integriert werden kann.

Die Nutzung von Abwärme im industriellen Bereich durch Hochtemperatur-Wärmepumpen ist einer der Schwerpunkte des Programms.

1.4 Verwendete Methoden

Um Abwärmepotentiale zu identifizieren, die mit der Wärmepumpe nutzbar gemacht werden können, wurden zunächst Expertengespräche mit den Betreibern der Prozesse geführt. Dazu wurden meist

mehrere Termine vor Ort wahrgenommen. Um die Datenerfassung und Analyse möglichst effizient und einheitlich zu gestalten, wurde im Vorfeld ein entsprechendes Analyseformular erarbeitet. Basierend auf den Gesprächen und den Prozessdaten wurden die Wärmequellen und –senken charakterisiert. Anhand der Energieflüsse wurde die Eignung der Prozesse für die Hochtemperatur-Wärmepumpe beurteilt. Die so ermittelten Daten dienen als Auslegungsparameter für die Entwicklung von je einem einstufigem und einem zweistufigem HTWP Funktionsmuster. Als Quelltemperatur für das einstufige Funktionsmuster wurde ein Bereich von 40°C bis 60°C definiert, für das zweistufige Funktionsmuster ein Bereich von 10°C bis 20°C. Die Senkentemperatur (Kondensatoraustritt) wurde für beide Funktionsmuster mit 100°C bis 130°C definiert. Aufgrund der analysierten Prozesse wurde eine Heizleistung von ca. 300 kW für die beiden Funktionsmuster definiert.

Die beiden Funktionsmuster wurden gebaut und auf den Prüfstand in verschiedenen Betriebspunkten betrieben und optimiert. Mit den ermittelten Messdaten wurden Simulationsmodelle der beiden Wärmepumpen erstellt, die in einer stationären Fließbildsimulation eingesetzt wurden. Damit wurden Industrieprozesse mit und ohne Wärmepumpe simuliert, sowie die Auswirkungen auf Energieverbrauch, CO₂-Emissionen und deren Wirtschaftlichkeit untersucht und dargestellt.

1.5 Aufbau der Arbeit

Abbildung 1 zeigt, wie die einzelnen Phasen des Projektes miteinander verbunden sind.

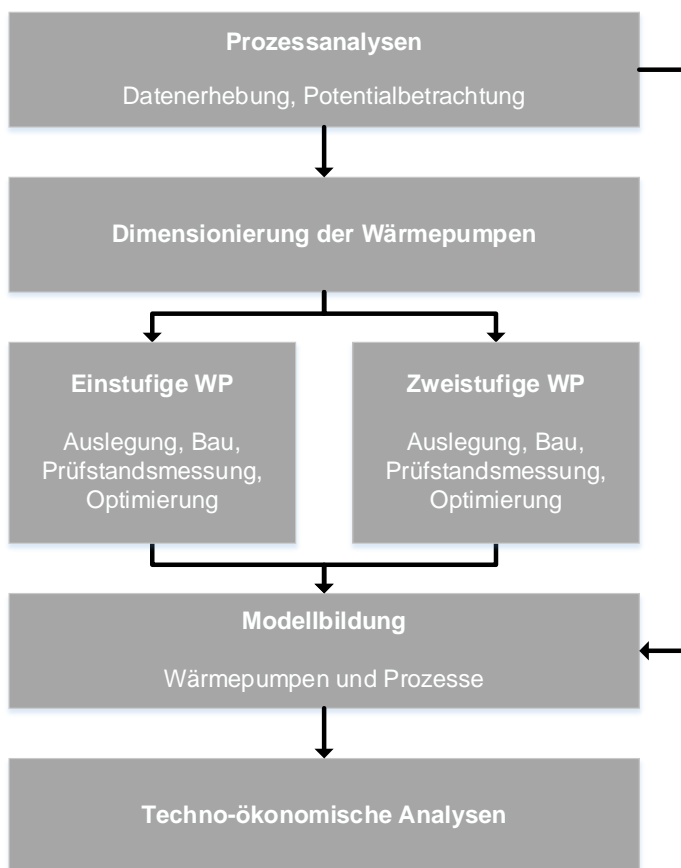


Abbildung 1: Aufbau des Projektes

Die folgenden Schritte wurden im Projektverlauf durchgeführt:

- Definition von industriellen Prozessen, bei denen der Einsatz einer Hochtemperatur-Wärmepumpe zur Abwärmenutzung energetisch, ökologisch und betriebswirtschaftlich Sinn ergeben könnte. Die Unternehmen, die untersucht wurden, haben zumeist bereits in einem LOI Interesse an diesem Projekt bekundet. Darüber hinaus wurden auch Prozesse anderer Unternehmen untersucht, die entsprechende Daten zur Verfügung stellten.
- Beurteilung der Potentiale an Hand von vereinfachten Berechnungen für die untersuchten Prozesse zur Definition der Auslegungsdaten für die beiden HTWP Funktionsmuster.
- Entwicklung, Auslegung der Kompressoren und Kältekreise mit allen Komponenten, Definition der Regelungs- und Steuerungsparameter, sowie der Sicherheitsfunktionen, Konstruktion und Erstellung der Fertigungsunterlagen.
- Bau der Funktionsmuster
- Test und Vermessung am HTWP Prüfstand, Dokumentation der Messergebnisse für das einstufige und das zweistufige Funktionsmuster
- Modellbildung und Simulation basierend auf Prüfstands Daten der Funktionsmuster und der Prozessanalysen
- Stationäre Simulation verschiedener Anwendungen der Hochtemperatur-Wärmepumpen
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und Betrachtung der Umweltauswirkungen für die Anwendungsfälle

2 Inhaltliche Darstellung

2.1 Prozessanalysen

Um Abwärmepotentiale und deren Nutzbarkeit für den Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen zu identifizieren, wurden gemeinsam mit den Betreibern von Industrieprozessen Expertengespräche geführt. Dabei wurden neben den relevanten Temperaturniveaus auch die Einsatzzeiten der Prozesse, die räumliche Anordnung der verschiedenen Komponenten und die derzeitige Energiebereitstellung diskutiert und zumeist vor Ort besichtigt. Basierend auf den Gesprächen und den erhobenen Prozessdaten wurden Wärmequellen und Wärmesenken charakterisiert.

2.1.1 Untersuchten Branchen und Prozesse (Auszug)

Es wurden Industrieprozesse aus verschiedenen Branchen untersucht, da sich die Prozesse je nach Produkt und Technologie stark unterscheiden und daher unterschiedliche Rahmenbedingungen für den Einsatz einer Hochtemperatur-Wärmepumpe auftreten. Für den Einsatz einer Hochtemperatur-Wärmepumpe sind sinnvolle Kombinationen der Wärmequellen und -senken nötig. Je geringer der Temperaturhub zwischen Quelle und Senke gestaltet werden kann, desto effizienter ist das System, da der COP (Coefficient of Performance, Leistungszahl) dadurch optimiert wird. Auch die jährlichen Betriebsstunden des Prozesses und damit die Auslastung des Wärmepumpensystems sind für einen

effizienten und wirtschaftlichen Betrieb wesentlich. Untersucht wurden verschiedene Anwendungen in der Papierindustrie, im Bereich der Energiedienstleistungen, Getränkeherstellung und -abfüllung, sowie verschiedene Molkereien.

Papierindustrie:

Für die Herstellung von Papier und Zellstoff werden große Mengen an Frischdampf benötigt, vor allem für die Papiertrocknung. Zurzeit werden biogene Energieträger, wie Rinde aus der Holzaufbereitung und Schwarzlauge, sowie fossile Energieträger zur Energiebereitstellung eingesetzt. Es treten verschiedene Abwärmeströme auf, die für die Integration einer Wärmepumpe geeignet sind. Als Wärmequellen sind die feuchte Abluft der Papiermaschine (60-90°C, mit Feuchtigkeit beladen) und erwärmtes Kühlwasser (40-60°C) interessant. Die Wärmepumpe wird zur Produktion von Niedertemperaturdampf mit 130°C eingesetzt.

Energiedienstleister:

Energiedienstleister betreiben Kraftwerksanlagen und verkaufen Strom, Wärme, Kälte und Dampf an ihre Kunden. Durch die Integration einer Wärmepumpe kann der Produktmix verändert werden, da Strom verbraucht wird und Wärme bereitgestellt wird. Als Wärmequelle kommt beispielsweise erwärmtes Turbinenöl einer Dampfturbine in Frage. Die Wärmepumpe ersetzt die bisherige Wasserkühlung und liefert Fernwärme.

Getränkeherstellung und –abfüllung:

Hier wird sowohl Prozesswärme, als auch Kälte benötigt. Prozesswärme wird auf zwei Temperaturniveaus (60°C und 110°C) für Reinigung und Pasteurisieren (Haltbarmachung) eingesetzt. Eine NH₃-Kälteanlage liefert Eiswasser, das zur Kühlung der Produkte erforderlich ist. Die Abwärme der Kälteanlage dient als Wärmequelle für die Wärmepumpe, die die beiden Warmwasserspeicher versorgt.

Molkerei:

Molkereien verarbeiten Rohmilch zu einer Reihe von Produkten, meist werden an einem Standort mehrere Produkte, wie Frischmilch, Buttermilch, Obers, Milchkonzentrate, etc. hergestellt. Zu den energieintensivsten Prozessen, die in einer Molkerei auftreten, zählen das Homogenisieren, das Pasteurisieren und die UHT-Erhitzung. Beim Homogenisieren wird die Milch unter hohem Druck durch feine Düsen gepresst, dabei werden die Fetttropfchen zerkleinert, gleichmäßig in der Milch verteilt und das Absetzen von Rahm verlangsamt. Zum Pasteurisieren wird Frischmilch auf ca. 70-75 °C erhitzt. Dabei werden pathogene Keime abgetötet, die Milch ist gekühlt etwa 6-10 Tage haltbar. Um ESL-Milch zu erzeugen, wird die Milch auf bis zu 125 °C erhitzt (ESL = extended shelf life, länger frisch im Regal). Bei der UHT-Erhitzung wird Milch kurz auf 136-150 °C erhitzt und rasch wieder abgekühlt (UHT = ultrahocherhitzt). Dadurch werden zahlreiche Keime abgetötet und eine lange Haltbarkeit ermöglicht. Zum Homogenisieren wird elektrische Energie für die Hochdruckpumpen benötigt, zur Wärmebereitstellung für das Pasteurisieren, die ESL- und die UHT-Erhitzung dient ein Gaskessel. Der dort erzeugte Dampf wird als Heißwasser mit rund 6 bar in Wärmetauschern eingesetzt. Da Milch bei 5 °C gelagert wird, wird Prozesskälte mit einer NH₃-Kälteanlage erzeugt. Der Kondensator der NH₃-

Kälteanlage, der die Abwärme an die Umgebung abgibt, kann durch die Wärmepumpe als Wärmequelle genutzt werden. Die Wärmepumpe liefert Heißwasser für das Erhitzen.

Es wurden noch weitere Prozesse analysiert, bei denen jedoch ein oder mehrere Ausschließungsgründe auftraten:

- Es wurde keine Hochtemperaturanwendung mit den im Projekt angestrebten Wärmenutzungstemperaturen zwischen 100 und 130°C identifiziert.
- Es besteht kein Interesse an der Wärmenutzung.
- Der Einbau von Wärmetauschern zur direkten Wärmeübertragung ist sinnvoller als der Einsatz der Wärmepumpe (vor allem bei Quellen mit Temperaturen über 100°C).

2.1.2 Einbindung der Wärmepumpe in die Prozesse:

Für die Einbindung der Hochtemperatur-Wärmepumpe in die Prozesse wurden je Anwendungsfall unterschiedliche Varianten mit den Betreibern diskutiert. Die richtige Einbindung in den Prozess ist entscheidend, damit einerseits der Industrieprozess weiterhin unverändert optimal arbeitet, andererseits die Hochtemperatur-Wärmepumpe ein Maximum an Abwärmenutzung ermöglicht und damit Prozesswärme liefern kann.

An allen untersuchten Standorten kann die Wärmepumpe in den Prozess sinnvoll eingebunden werden, es treten keine wesentlichen Einschränkungen auf. Herausforderungen wurden festgestellt in Bezug auf die hydraulische Verschaltung und Einbindung in den Gesamtprozess. Besonders wichtig ist, dass der jeweilige Produktionsprozess durch den Einsatz der Wärmepumpe nicht beeinträchtigt wird. Je nach Abwärmequelle sind entsprechende Zwischenwärmetauscher zur Vermeidung von Korrosionsproblemen oder Verschmutzung einzusetzen.

Die Einbindung der Wärmepumpe in den Prozess liefert wichtige Randbedingungen für die Auslegung der beiden Funktionsmuster, die in diesem Projekt entwickelt wurden.

2.1.3 Ergebnisse der Prozessanalysen:

Die Prozesse wurden an Hand von vereinfachten Potentialberechnungen verglichen, um die interessantesten Anwendungen zu finden. Dazu wurden die möglichen Energiekosteneinsparungen basierend auf den Angaben der Unternehmen, sowie die CO₂-Einsparungen nach EN15603 berechnet. Die Faktoren aus EN15603 gehen von einem großen nichterneuerbaren Anteil der Stromproduktion aus und stellen damit den „Worst Case“ dar (siehe auch Kapitel 2.6.1 und Tabelle 5). Die wesentlichen Ergebnisse und Auslegungsparameter sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst.

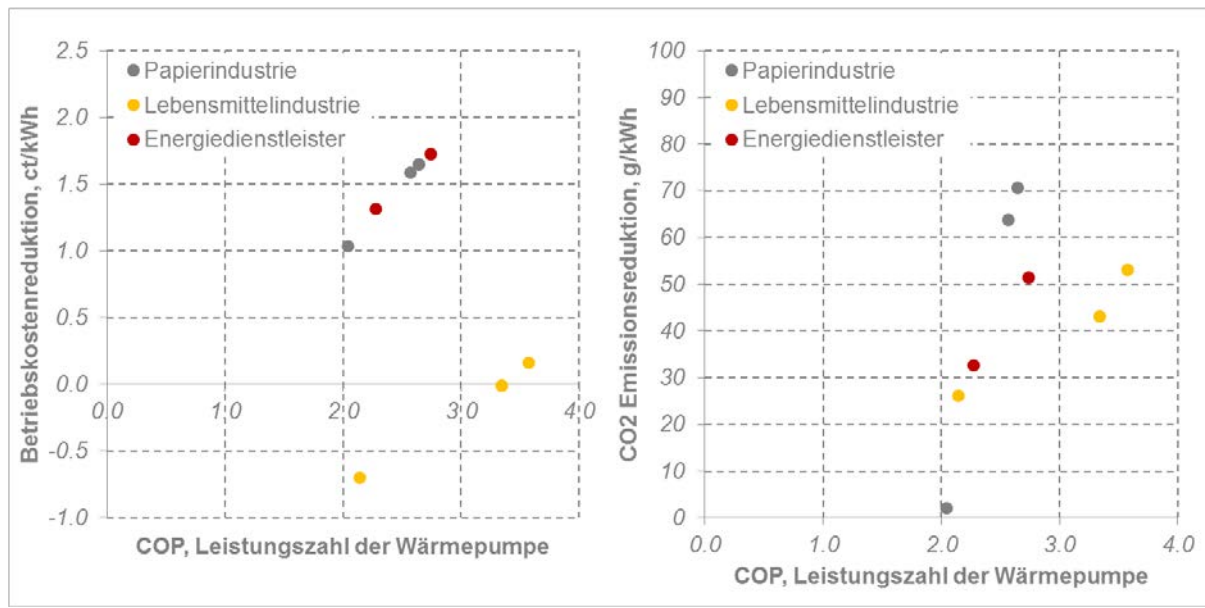


Abbildung 2: Potentialabschätzung für Hochtemperatur-Wärmepumpen

2.1.4 Definition der Auslegungsdaten für die beiden HTWP Funktionsmuster.

Für die weitere Entwicklung der beiden HTWP Funktionsmuster wurden die analysierten Prozesse entsprechend klassifiziert. Folgende Größen wurden dabei für die Klassifizierung betrachtet:

- Temperatur des Prozesses, der als Quelle dient
- die erforderliche Temperatur auf der Wärmenutzungsseite der Wärmepumpe
- der Temperaturhub zwischen Senke (Kondensator Austritt) und Quelle (Verdampfer Eintritt)

Zu den jeweiligen Prozessen wurden einstufige oder zweistufige Wärmepumpenprozesse zugeordnet. Abhängig von Temperaturhub sind einstufige oder zweistufige Hochtemperatur-Wärmepumpen auszuwählen. Bis zu einem Temperaturhub von etwa 75 °C werden einstufige Wärmepumpen, bei größeren Temperaturhüben (bis 125 °C) werden zwei stufige Wärmepumpen eingesetzt. Diese Festlegung resultiert aus den Einsatzgrenzen der Kompressoren, die von der Kompressor Endtemperatur und der maximal zulässigen Verdampfungstemperatur des Kältemittels abhängen. Abbildung 3 gibt einen Überblick über die Prozesstemperaturen.

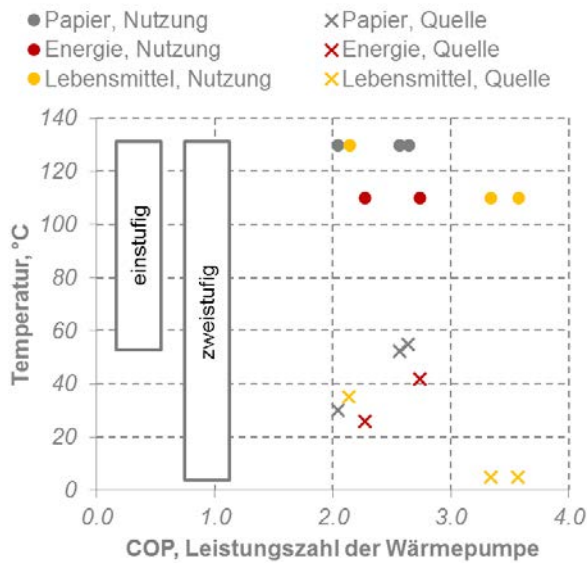


Abbildung 3: Prozessdaten zur Auslegung der Wärmepumpen

Auf Basis dieser Zuordnungen, den Einsatzgrenzen der ausgewählten Verdichter und Kältemittel konnte die Auslegung der Komponenten für das einstufige und zweistufige HTWP Funktionsmuster erfolgen.

- Für das einstufige Funktionsmuster wurde als Auslegungspunkt des Kältekreislaufs und der Komponenten W 55 / W 130 (55°C Verdampfer Eintritt, 130°C Kondensator Austritt) definiert.
- Für das zweistufige Funktionsmuster wurde als Auslegungspunkt des Kältekreislaufs und der Komponenten W 15 / W 130 (15°C Verdampfer Eintritt, 130°C Kondensator Austritt) definiert.

Diese Auslegungstemperaturen haben sich aus den Mittelwerten der analysierten Prozesse und internen Diskussionen der Entwicklungsingenieure von OCHSNER ergeben.

2.2 Entwicklung und Konstruktion der beiden HTWP Funktionsmuster

Bei der Bestimmung und Auswahl geeigneter Schraubenverdichter mussten folgende technische Probleme untersucht und gelöst werden:

Die kritischen Teile des Verdichters in Bezug auf die geplante Vorlauftemperatur von 130°C und die gleichzeitig daraus resultierende sehr hohe Kompressor-Endtemperatur von mehr als 130°C mussten entsprechend dimensioniert und ausgelegt werden. Dazu gehört unter anderem:

- Die konstruktive Anpassung der Kompressor-Lager
- Die Auslegung eines geeigneten dreiphasigen Asynchronmotor für hohe Betriebstemperaturen

Ein besonderes Thema war die Festlegung und Auswahl eines geeigneten Öls, welches ausreichend hohe Viskosität bei mögliche Heißgastemperatur von >130°C (bis 160°C) garantieren kann. Als zwei mögliche Varianten, welche am Prüfstand mit den Funktionsmustern getestet wurden, haben sich Esteröl und Silikonöl als am besten geeignet herauskristallisiert.

Ein wichtiger Punkt bei Auslegung und Berechnung der Kältekreis Komponenten war die Dimensionierung des Öl-Unterkühlungskreislaufs. Dies hat einen direkten Einfluss auf Lebensdauer des Verdichters und Betriebssicherheit bei geplanter 130°C Vorlauftemperatur.

Das Kältemittel aus dem Vorprojekt TOPPUMP (FFG Proj.Nr. 818769, Entwicklung von technisch optimierten Großwärmepumpen), ÖKO1, wird als geeignet eingestuft, da es die folgenden Kriterien erfüllt:

- Höchstmögliche kritische Temperatur >150°C
- Große Volumetrische Kälteleistung

Da dieses Kältemittel kein Low GWP Kältemittel ist (GWP = Global Warming Potential), werden in weiteren Entwicklungsstufen auch HFO (Hydro-Fluor-Olefine) und Low GWP Kältemittel in Betracht gezogen.

Auf der Basis dieser Recherchen wurden die Kältekreisläufe der beiden Funktionsmuster definiert. Anschließend erfolgte die Dimensionierung der anderen Hauptkomponenten und die Konstruktion der beiden Funktionsmuster, samt Erstellung der für den Musterbau erforderlichen Unterlagen.

2.3 Bau der beiden HTWP Funktionsmuster

Nach der Auslegung der Kältekreise und der einzelnen Komponenten erfolgte die Konstruktion der beiden HTWP Funktionsmuster. Zuerst wurde das einstufige Funktionsmuster konzipiert. Im Anschluss an die Konstruktion erfolgte die Erstellung der für den Musterbau erforderlichen Unterlagen (Stücklisten, Arbeitspläne, Bestellvorgaben, usw.).

Nach der Fertigstellung des einstufigen Funktionsmusters und ersten Testläufen am IWP Prüfstand erfolgte die Konzipierung und Konstruktion des zweistufigen Funktionsmusters. Damit konnten Erfahrungen aus dem Bau und den Testläufen des einstufigen Funktionsmusters in die Konzeption des zweistufigen Funktionsmusters einfließen.

2.4 Test und Vermessung der beiden Funktionsmuster am HTWP Prüfstand

Nach der Fertigstellung des einstufigen HTWP Funktionsmusters wurde dieses am Ochsner IWP Prüfstand aufgebaut und unter den verschiedensten Betriebsbedingungen vermessen. Die Labortests begannen im November 2015, wurden dann aber unterbrochen, da am Prüfstand Adaptionen für die hohe Temperatur von 130°C und die dabei herrschenden Systemdrücke erforderlich waren. Einige Komponenten des Prüfstands wurden ausgetauscht, da diese nicht auf den Betrieb mit 130°C und den dabei herrschenden Systemdrücken zertifiziert waren.

Nach Erweiterung des Prüfstandes wurden die Labortests des einstufigen Funktionsmusters im April 2016 fortgesetzt. Mit den verschiedenen Messreihen wurden auch die Einstellungsparameter des Kältekreislaufs optimiert. Auch die Regelung des Anlaufverhaltens und die Abschaltstrategie wurden entsprechend optimiert.

Ein Auszug der optimierten Messergebnisse des einstufigen Funktionsmusters ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Leistungsaufnahme ist inklusive Ölpumpe(n) und Wasserpumpe(n) auf der hydraulischen Seite des Ölkühlers angegeben und somit auch im COP berücksichtigt.

Tabelle 1: Auszug aus den Messergebnissen des einstufigen Funktionsmusters

Betriebspunkt	W 45-41/ W 75-80	W 45-41/ W 85-90	W 45,2-41,1/ W 100-104,8	W 50-46/ W 94,9-100	W 50-46,4/ W 100,2-105	W 55-51,2/ W 95-100	W 55-51,2/ W 100-105	W 60-56/ W 95-100,2	W 60-56/ W100,1-105,1
Heizleistung [kW]	284,9	278,8	261,5	324,4	312,2	362,4	347,8	391,6	386,4
El. Leistungsaufnahme [kW]	75,6	87,6	111,0	109,0	116,4	112,9	120,3	115,9	126,7
COP	3,77	3,18	2,36	2,98	2,68	3,21	2,89	3,38	3,05

Nach Fertigstellung des zweistufigen Funktionsmusters wurde auch dieses am Prüfstand aufgebaut und in mehreren Testreihen ausführlich vermessen und optimiert. Die Optimierungen waren beim zweistufigen Funktionsmuster wesentlich aufwändiger und umfangreicher. Es musste hier nicht nur ein Kältekreis, sondern es mussten zwei Kältekreise optimiert werden. Dabei musste auch das Anlaufverhalten zwischen Stufe 1 und Stufe 2 regelungstechnisch optimiert werden. Das Gleiche gilt für das Verhalten beim Abschalten.

Ein Auszug der optimierten Messergebnisse des einstufigen Funktionsmusters ist in Tabelle 2 dargestellt. Auch hier ist die Leistungsaufnahme inklusive Ölpumpe(n) und Wasserpumpe(n) auf der hydraulischen Seite des Ölkühlers angegeben und somit auch im COP berücksichtigt.

Tabelle 2: Auszug aus den Messergebnissen des zweistufigen Funktionsmusters

Betriebspunkt	W10-6/ W92-100	W10-6,7/ W101-110	W10-7/ W121-130	W15-11/ W92-100	W15-11/ W101-110	W15-12/ W121-130	W20-15/ W91-100	W20-16/ W100-110	W20-16/ W110-130
Heizleistung [kW]	274	283	298	304	311,6	312,4	324	328	330
El. Leistungsaufnahme [kW]	156	177	192,2	156,8	176	225	163	181	235
COP	1,76	1,6	1,55	1,94	1,77	1,39	1,99	1,82	1,4

Beide Funktionsmuster liefen bei verschiedensten Quelltemperaturen (Verdampfer Eintritt) und Senkentemperaturen (Kondensator Austritt) absolut störungsfrei und stabil.

Das einstufige Funktionsmuster wurde mit Quelltemperaturen von 40°C bis 65°C beaufschlagt. Die Kondensatoraustrittstemperatur variierte dabei in einem Bereich von 80°C bis 130 °C. Das zweistufige Funktionsmuster wurde mit Quelltemperaturen von 10°C bis 20°C beaufschlagt. Die Kondensatoraustrittstemperatur variierte dabei in einem Bereich von 100°C bis 130 °C.

Der OCHSNER Prüfstand für Industriewärmepumpen, der in Abbildung 4 ersichtlich ist, ermöglicht eine Prüfung von Industriewärmepumpen im Leistungsbereich von 80 – 1000 kW Heizleistung im Volllastbetrieb. Dabei werden alle relevanten Messgrößen wie z.B. Temperaturen, Drücke, elektrische Werte, Heizleistungen mit Genauigkeiten (Toleranzen) gem. EN-14511 gemessen und aufgezeichnet [1]. Nach Abschluss jeder Prüfung wird automatisch ein detailliertes Prüfprotokoll generiert. Durch Vollautomatisierung des Prüfstands können alle Teillastbereiche stabil abgefahren und getestet werden. Dies betrifft auch gewählte und genormte Betriebspunkte, welche für die Optimierung und Entwicklung einer neuen Wärmepumpe notwendig sind.



Abbildung 4: Ochsner IWP Prüfstand für Industriewärmepumpen (Quelle: Ochsner Wärmepumpen GmbH / Ochsner Energie Technik GmbH.)

Abbildung 5, Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen das zweistufige Funktionsmuster während der Testläufe am Ochsner IWP Prüfstand. Die Verkabelung ist aufgrund der verschiedenen zusätzlichen Messpunkte für den umfangreichen Testbetrieb sehr aufwändig.

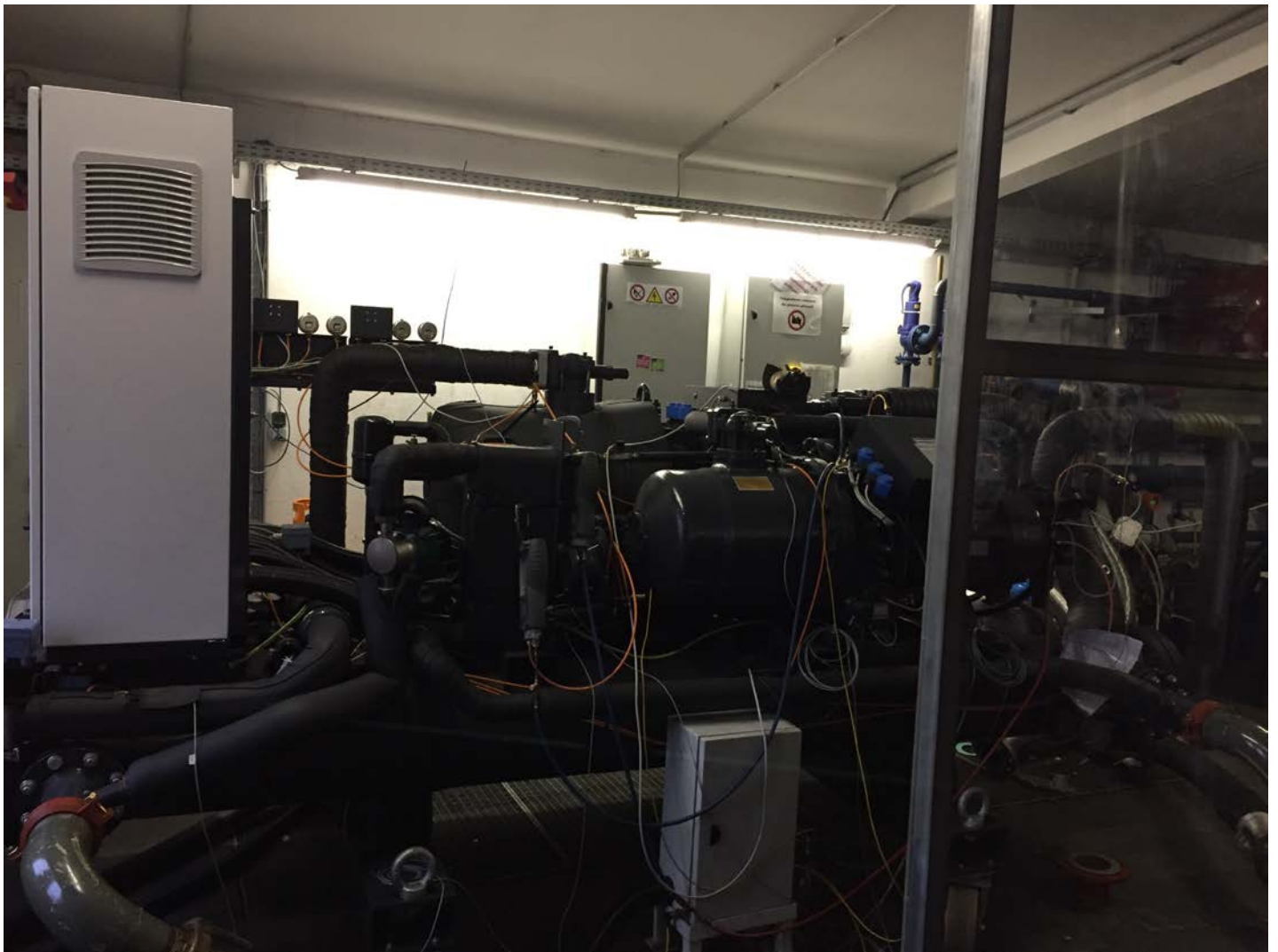


Abbildung 5: Zweistufiges HTWP Funktionsmuster am OCHSNER IWP Prüfstand inklusive diverser Verkabelung für die Messungen (Quelle: Ochsner Wärmepumpen GmbH / Ochsner Energie Technik GmbH.)



Abbildung 6: Zweistufiges HTWP Funktionsmuster am OCHSNER IWP Prüfstand, Ansicht auf schalt- und Regelschrank mit Touch Display (Quelle: Ochsner Wärmepumpen GmbH / Ochsner Energie Technik GmbH.)



Abbildung 7: Zweistufiges HTWP Funktionsmuster am OCHSNER IWP Prüfstand, Ansicht Rückseite (Quelle: Ochsner Wärmepumpen GmbH / Ochsner Energie Technik GmbH.)

2.5 Modellbildung

2.5.1 Methode

Um die Auswirkungen der Integration einer Wärmepumpe auf einen Prozess festzustellen, werden Prozesssimulationen erstellt. Dazu kommt die Simulationssoftware IPSEpro (Integrated Process Simulation Environment) zur Anwendung. IPSEpro ist ein gleichungsorientiertes Simulationsprogramm für stationäre Fließprozesse, das für Prozesssimulationen im Bereich der Kraftwerks- und Energietechnik entwickelt wurde. Für die Simulation wird der Prozess mit allen wesentlichen Komponenten als Fließbild in IPSEpro abgebildet. Die einzelnen Komponenten (Gaskessel, Wärmetauscher, Pumpen, Verdichter, etc.) sind durch stoff- und energieführende Leitungen miteinander verbunden. Die Prozesskomponenten werden entsprechend den Erhaltungssätzen für Masse und Energie bilanziert und können entweder der Modellbibliothek der Simulationssoftware entnommen oder selbst angelegt werden. In den Modellbibliotheken sind die wesentlichen Komponenten für Kompressions- und Absorptionswärmepumpen verfügbar, ebenso wie Kraftwerkskomponenten, wie Turbinen, Feuerungen, etc. Für die Berechnung der Massen- und Energiebilanzen können in IPSEpro zahlreiche Stoffe ausgewählt werden, wie Wasser/Dampf nach IAPWS97 [2], ideale Gase, zahlreiche Kältemittel, die mit der Refprop-Datenbank verknüpft sind und die Absorptionsstoffpaare Lithiumbromid/Wasser und Wasser/Ammoniak. [3]

Für die beiden Wärmepumpen aus *Hotpump Reloaded* wurden Simulationsmodelle in IPSEpro erstellt, ein Grey-Box-Modell für die zweistufige Wärmepumpe und ein detailliertes Modell für die einstufige Wärmepumpe. Es werden die Industrieprozesse mit und ohne Wärmepumpe abgebildet, um den Einfluss der Wärmepumpe auf die Prozesse festzustellen. Durch die Massen- und Energiebilanz sind sämtliche Prozessgrößen bekannt, die zur techno-ökonomischen Bewertung benötigt werden.

2.5.2 Grey-Box-Modell

Das Grey-Box-Modell ist ein deutlich vereinfachtes Modell, das darauf beruht, dass die reale Wärmepumpe mit dem idealen Carnotprozess verglichen wird. In das Modell gehen die Prozesstemperaturen der Quelle und der Senke, der Strombedarf, die Wärme, die der Quelle entnommen wird und die nutzbare Wärme, die bereitgestellt wird, ein. Der reale COP wird über den Gütegrad mit dem COP des idealen Carnotprozesses verknüpft. Das Grey-Box-Modell kann verwendet werden, ohne dass Kältemittel, Verdichterbauart oder Konfiguration des Kältekreislaufes spezifiziert werden müssen. Daher kann es beispielsweise mit einem Schätzwert für den Gütegrad in einem beliebigen Temperaturbereich zur Potentialabschätzung eingesetzt werden.

An Hand der Messdaten des zweistufigen Funktionsmusters wurden Korrelationen für den COP des idealen Carnotprozesses, den realen COP und die Heizleistung in Abhängigkeit von der Wärmenutzungstemperatur und dem Temperaturhub erstellt. Dadurch verhält sich das Grey-Box-Modell ähnlich wie die im Projekt entwickelte Wärmepumpe.

Abbildung 8 gibt einen Überblick über die Betriebspunkte der Wärmepumpe bei der Prüfstandsmessung. Dabei wurden die Eintrittstemperaturen der Wärmequelle von 10 bis 20°C und die Wärmenutzungstemperaturen von 100 bis 130°C variiert. In jedem Betriebspunkt wurden Temperaturen und Drücke an verschiedenen Stellen im Kältekreislauf, sowie die elektrische Leistung der Verdichter und

die Heizleistung gemessen. Diese Messdaten wurden für die Berechnung der Korrelationen des Grey-Box-Modells verwendet.

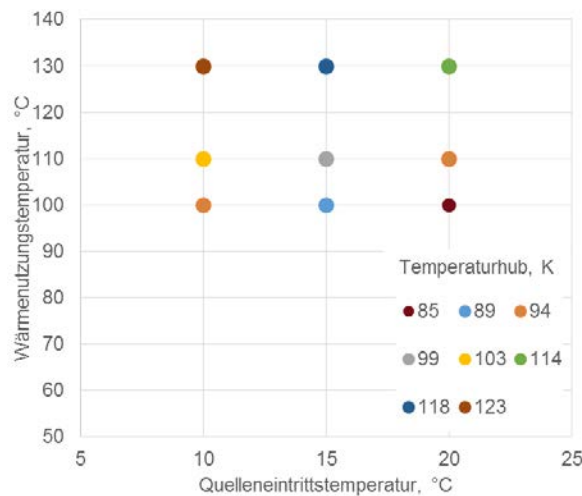


Abbildung 8: Versuchspunkte der Prüfstandmessung (zweistufige WP)

Der COP der Wärmepumpe (Leistungszahl) beschreibt das Verhältnis von Heizleistung und elektrischer Leistung. Der COP des idealen Carnotprozesses wird mit den Prozesstemperaturen der Quelle und der Senke, sowie den Temperaturdifferenzen des Kondensators und Verdampfers berechnet. Beide COP hängen daher vom Betriebspunkt der Wärmepumpe ab und werden maßgeblich von der Wärmenutzungstemperatur und dem Temperaturhub bestimmt. Das Gleiche gilt auch für die Heizleistung. Daher werden für diese Größen zusammengesetzte lineare Funktionen aus den Messdaten nach dem Aufbau von Gl. (1) beschrieben.

$$A = k_1(T_{Kond,aus} - T_{Verd,aus}) + k_2 T_{Kond,aus} + k_3 \tag{1}$$

Für die Betriebspunkte mit gleicher Wärmenutzungstemperatur (100, 110, 130°C) wird jeweils eine lineare Regressionsgerade ermittelt. Die Konstante k_1 ist der Mittelwert der Steigungen dieser Geraden. Der Einfluss der Wärmenutzungstemperatur kann näherungsweise so beschrieben werden, dass die Geraden dadurch nach oben oder unten verschoben werden. Das geben die Konstanten k_2 und k_3 an (Tabelle 3).

Tabelle 3: Korrelationen für das zweistufige Wärmepumpenmodell

A		k_1	k_2	k_3
COP Wärmepumpe	COP	-0,0106	-0,0045	3,2815
COP Carnotprozess	COP_{Carnot}	-0,0276	0,0055	5,8223
Heizleistung	\dot{Q}_H	-4,6328	4,8942	225,7622

Mit dem parametrisierten Modell wurden nochmals alle Versuchspunkte nachgerechnet. Das Modell kann in allen Versuchspunkten die Massen- und Energiebilanzen mit den angegebenen Korrelationen lösen. Abbildung 9 zeigt Abweichung des Modells von den Messungen. Es wurde der COP ausgewählt, weil es sich um eine wichtige Kenngröße für die techno-ökonomische Bewertung handelt. Liegen die Punkte auf der Linie, stimmen die Werte überein, je weiter die Punkte von der Linie entfernt sind, desto ungenauer ist das Modellergebnis. Das Bestimmtheitsmaß R^2 gibt an, wie gut die Punkte durch einen linearen

Zusammenhang beschrieben werden können. Dieses einfache Modell stimmt relativ gut mit den Messwerten überein, was an hohen Werten für R^2 erkennbar ist.

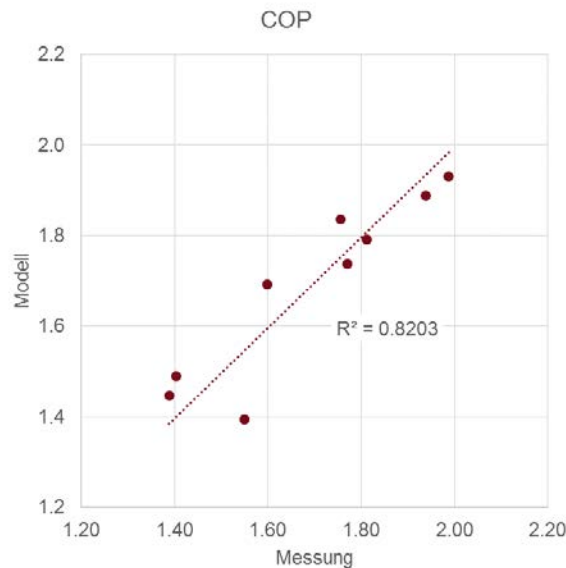


Abbildung 9: Vergleich von Modell und Messung: COP zweistufige Wärmepumpe

2.5.3 Detailliertes Modell

Das detaillierte Modell wurde für die einstufige Wärmepumpe erstellt. Es handelt sich um eine einstufige Kompressionswärmepumpe mit Schraubenverdichter und Economizerschaltung. Der schematische Aufbau der Wärmepumpe wird in Abbildung 10 gezeigt. Es wird ein Teilstrom des flüssigen Kältemittels nach dem Kondensator in einem Expansionsventil entspannt. Der Teilstrom wird im Economizer-Wärmetauscher verdampft und bei einem mittleren Druck in den Verdichter eingebracht. Der verbleibende Kältemittelstrom, der nicht verdampft wird, wird im Economizer-Wärmetauscher weiter unterkühlt und in einem weiteren Expansionsventil auf den Verdampfungsdruck gedrosselt. Im Verdampfer nimmt dieser Kältemittelstrom Wärme auf, verdampft und wird im Verdichter verdichtet. Durch den Economizer hat der Verdichter bei gleicher elektrischer Leistung eine höhere Kapazität und fördert einen größeren Massenstrom. Der Verdichter ist außerdem mit einem Ölkühler ausgerüstet, damit die Endtemperatur des Verdichters nicht zu hoch wird.

Das Modell der Wärmepumpe wurde in IPSEpro analog zu Abbildung 10 aufgebaut. Das bestehende Verdichtermodell der Modellbibliothek wurde dazu um den Economizeranschluss erweitert. Die Verdichtung besteht nun aus drei Teilschritten:

- Verdichten auf Mitteldruck
- Zumischen des Teilstroms
- Verdichten auf Enddruck

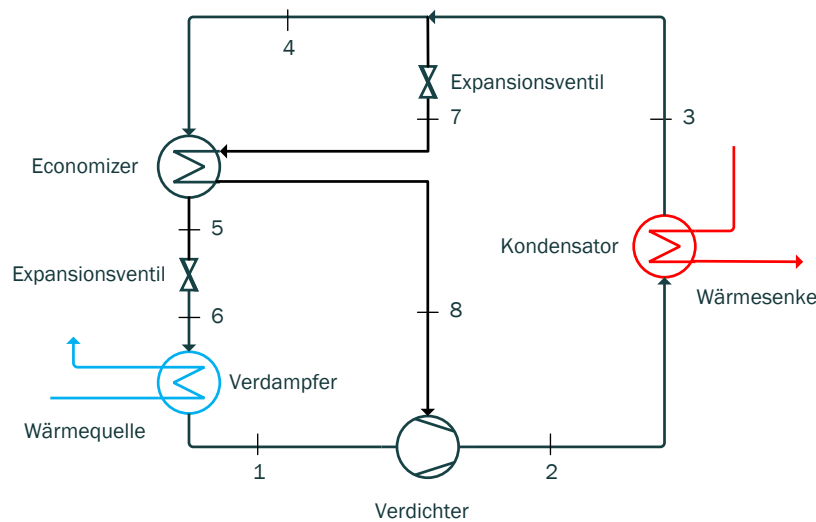


Abbildung 10: Schematischer Aufbau der Hochtemperatur-Wärmepumpe

Der Verdichtungsprozess ist nicht isentrop und nicht adiabatisch und wird daher durch einen isentropen Wirkungsgrad und einen austretenden Wärmestrom beschrieben. Der isentrope Wirkungsgrad gibt die Abweichung von der isentropen Verdichtung an. Es wird angenommen, dass für beide Verdichtungsprozesse der gleiche isentrope Wirkungsgrad gilt. Der Wärmestrom gilt ebenfalls für den gesamten Verdichter und umfasst den Ölkühler und etwaige weitere Wärmeverluste an die Umgebung. Da der Ölkühler am Prüfstand nicht separat bilanziert wird, kann nicht zwischen dem Ölkühler und weiteren Wärmeverlusten unterschieden werden.

Die beiden Expansionsventile sind als adiabate Drosselungen dargestellt. Außerdem können Rohrleitungswärmeverluste nach dem Kondensator und vor dem Expansionsventil des Hauptstroms berücksichtigt werden.

Auf dem Prüfstand der Ochsner Energie Technik GmbH wurde die Wärmepumpe in verschiedenen Betriebspunkten vermessen. Dabei wurden die Eintrittstemperaturen der Wärmequelle von 45 bis 60°C und die Wärmenutzungstemperaturen von 80 bis 105°C variiert. Abbildung 11 gibt einen Überblick über die Betriebspunkte der Prüfstandsmessung. In jedem Betriebspunkt wurden Temperaturen und Drücke an verschiedenen Stellen im Kältekreislauf, sowie die elektrische Leistung des Verdichters und die Heizleistung gemessen. Dieses Kennfeld war die Grundlage für die Modellbildung.

Zunächst wurden alle Betriebspunkte in IPSEpro nachgerechnet. Durch die zahlreichen Messgrößen ist das Gleichungssystem überbestimmt. Daher können der isentrope Wirkungsgrad und der austretende Wärmestrom des Verdichters, sowie die Wärmeverluste in den Rohrleitungen berechnet werden. Durch die Nachrechnung in IPSEpro können alle Zustandsgrößen in jedem Prozessschritt der Wärmepumpe bestimmt werden.

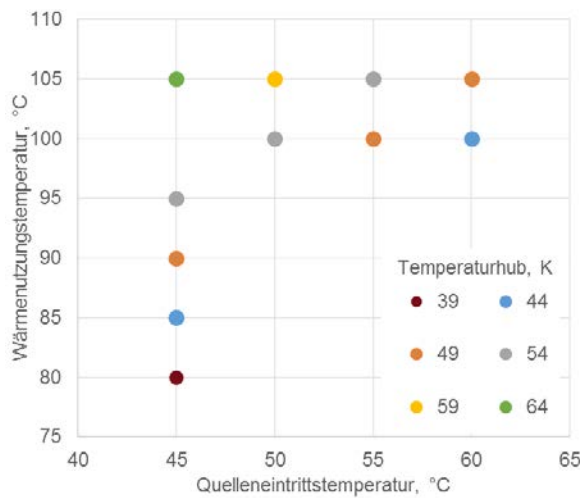


Abbildung 11: Versuchspunkte der Prüfstandmessung

Als Beispiel dafür zeigt Abbildung 12 das log p-h Diagramm des Kältekreislaufes für die Quellentemperatur von 45°C und die Wärmenutzungstemperatur von 105°C. Der Abschnitt 3-7-8 ist der Teilstrom, der im Economizer verdampft wird, Abschnitt 6-1 der Verdampfer und Abschnitt 2-3 der Kondensator. Der Abschnitt 3-4, sowie die eng nebeneinander liegenden Punkte bei 5 und 1 stellen Rohrleitungswärmeverluste dar.

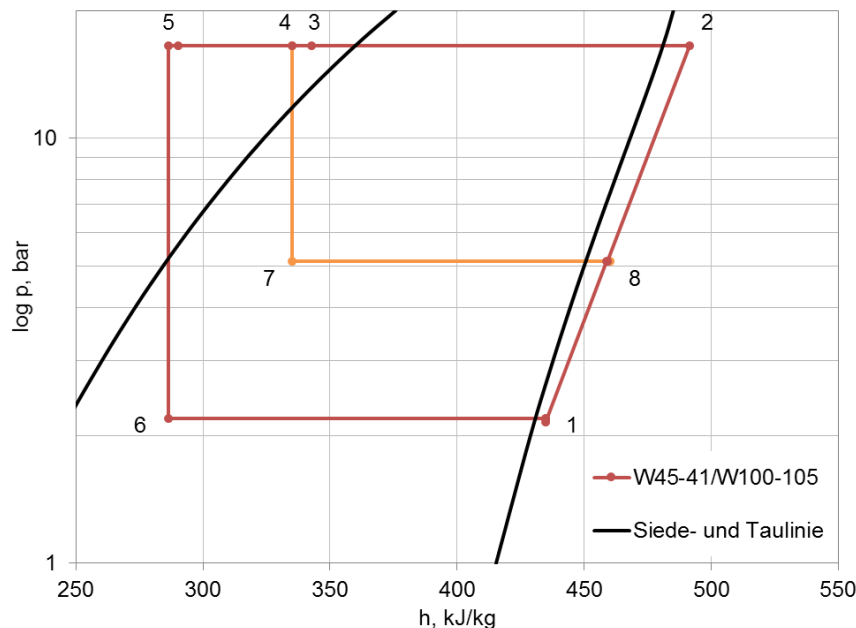


Abbildung 12: log p-h Diagramm des Kältekreislaufes (Nachrechnung)

Ziel der Modellbildung ist es, dass das Wärmepumpenmodell in Systemsimulationen eingebunden werden kann und es sich dabei so wie die Wärmepumpe am Prüfstand verhält. Dazu sollen die Größen, die zur Regelung einer „realen“ Wärmepumpe verwendet werden, als wählbare Eingangsgrößen dienen. Diese Setzwerte sind die Temperatur der Wärmequelle und die Wärmenutzungstemperatur. In das Modell gehen auch konstante Größen ein, die für alle Versuchspunkte gelten. Dazu gehören die Überhitzungsregelung der Expansionsventile, die die Temperatur des Kältemittels am Verdampferaustritt

und nach dem Economizer-Wärmetauscher bestimmt, und die Unterkühlung am Kondensatoraustritt. Alle anderen Größen, die man zur Berechnung des Kältekreises braucht, werden als Korrelationen implementiert, die aus den Prüfstandsdaten abgeleitet werden. Dabei handelt es sich um die Heizleistung, die elektrische Leistung, den isentropen Wirkungsgrad, den Volumenstrom am Verdichtereintritt und den Economizerdruck. Da diese Parameter wesentlich durch die Wärmenutzungstemperatur und den Temperaturhub der Wärmepumpe beeinflusst werden, werden zusammengesetzte lineare Funktionen nach dem Aufbau von Gl. (2) erstellt.

$$A = k_1 T_{Kond,aus} + k_2 (T_{Kond,aus} - T_{Verd,aus}) + k_3 \tag{2}$$

Für die Betriebspunkte mit gleichem Temperaturhub (44, 49, 54 K) wird eine lineare Regressionsgerade ermittelt. Die Konstante k_1 ist der Mittelwert der Steigungen dieser Geraden. Der Einfluss des Temperaturhubs kann näherungsweise so beschrieben werden, dass die Geraden dadurch nach oben oder unten verschoben werden. Das geben die Konstanten k_2 und k_3 an (Tabelle 4)

Der Wärmeverlust in der Rohrleitung vor dem Verdichter wird mit Gl. (3) beschrieben.

$$\dot{Q}_{loss} = 0,444 T_{Verd,sein} - 15,814 \tag{3}$$

Tabelle 4: Korrelationen für das Wärmepumpenmodell

A		k_1	k_2	k_3
Heizleistung	\dot{Q}_H	7,338	-8,078	15,473
Elektr. Strom	P_{el}	2,459	-0,963	-85,562
Isentroper Wirkungsgrad	η_s	0,003	-0,007	0,791
Volumenstrom	\dot{V}	0,001	-0,002	0,115
Economizerdruck	p_{eco}	0,212	-0,159	-6,946

Mit dem parametrisierten Modell wurden nochmals alle Versuchspunkte nachgerechnet. Das Modell kann in allen Versuchspunkten die Massen- und Energiebilanzen mit den angegebenen Korrelationen und Setzwerten lösen.

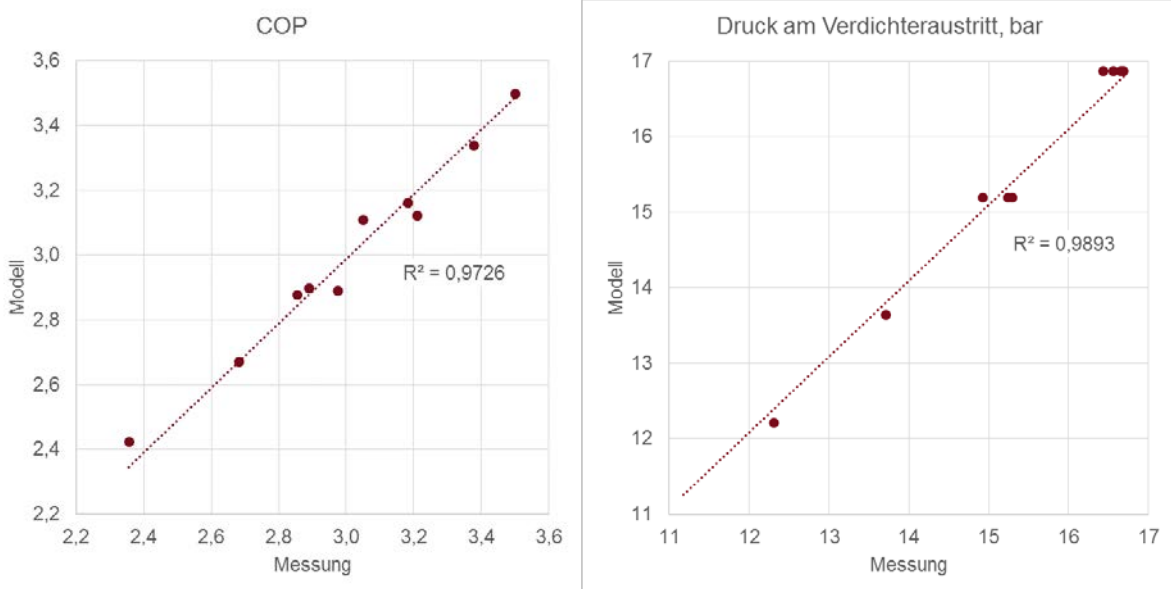


Abbildung 13: Vergleich von Modell und Messung (links: COP, rechts: Druck am Verdichteraustritt)

Um die Abweichung des Modells von den Messungen darzustellen, wurden in Abbildung 13 einige Modellergebnisse über den Messwerten aufgetragen. Wie bei der zweistufigen Wärmepumpe wurde der COP ausgewählt. Der Verdichterenddruck dient als Beispiel für die Zustände im Kältekreis. Das Modell stimmt gut mit den Messwerten überein, was an hohen Werten für R^2 erkennbar ist.

2.6 Prozesssimulation und techno-ökonomische Bewertung

2.6.1 Methode

Es werden die Prozesse mit und ohne Wärmepumpe in IPSEpro abgebildet, um den Einfluss der Wärmepumpe auf die Prozesse festzustellen. Durch die Massen- und Energiebilanz sind sämtliche Prozessgrößen bekannt, die zur techno-ökonomische Bewertung benötigt werden. Dazu werden die CO_2 -Emissionen und der Primärenergieeinsatz für den Prozess vor und nach der Integration der Wärmepumpe berechnet und gegenübergestellt. Prozesswärme wird meist in erdgasbefeuerten Kesseln bereitgestellt. Durch den Einsatz der Wärmepumpe wird der Erdgaseinsatz reduziert, aber dafür elektrischer Strom für den Verdichter benötigt.

2.6.1.1 Umweltauswirkungen

Der CO_2 -Emissionsfaktor f_{CO_2} beschreibt, wie viel CO_2 pro Einheit an Endenergie, die als Prozesswärme verfügbar ist, in die Atmosphäre abgegeben wird. Dabei können neben den CO_2 -Emissionen auch andere treibhauswirksame Gase, wie Methan oder Lachgas, berücksichtigt werden (CO_2 Äquivalent). Der Primärenergiefaktor f_{Prim} gibt an, wie viel Energie benötigt wird um eine Einheit der Endenergie bereitzustellen. Dabei wird erfasst, wie viel Energie für die Förderung, Verarbeitung, Speicherung, Transport, Umwandlung, Übertragung und Verteilung benötigt wird. Hier werden nur nicht-erneuerbaren Anteile des Primärenergieaufwandes betrachtet. Die CO_2 -Emissionen und der Primärenergieeinsatz hängen maßgeblich von der Zusammensetzung des elektrischen Stroms ab, die der Berechnung zu Grunde liegt. In Tabelle 5 werden verschiedene Faktoren für Strom und Gas angeführt. Die Faktoren aus EN15603 gehen von einem großen nichterneuerbaren Anteil der Stromproduktion aus und gehen auf das Jahr 1996 zurück. Bei diesen CO_2 -Faktoren werden nur die CO_2 -Emissionen berücksichtigt. „Ö2011“ beschreibt die Erdgasnutzung und den elektrischen Strommix in Österreich im Jahr 2011, die Faktoren wurden GEMIS entnommen [4]. Die CO_2 -Faktoren aus „Ö2011“ berücksichtigen auch andere treibhauswirksame Gase (CO_2 Äquivalent).

Zur Berechnung der Einsparpotentiale werden die Betriebsstunden benötigt. Wenn nichts anderes angegeben wird, betragen die Volllaststunden 8400 h/a.

Tabelle 5: Überblick über die verwendeten CO_2 - und Primärenergiefaktoren

				EN15603	Ö2011
CO ₂ -Emissionen	f _{CO₂}	Gas	g/kWh	277	248
		Strom	g/kWh	617	300
Primär-energie	f _{Prim}	Gas	kWh/kWh	1,36	1,18
		Strom	kWh/kWh	3,14	1,07

2.6.1.2 Wirtschaftlichkeit

Zur Beurteilung der Energiekosten ist das Preisverhältnis von elektrischem Strom und Gas maßgeblich. Wesentliche Unterschiede ergeben sich beim Strompreis durch die verschiedenen Netzebenen. Je höher der Leistungsbedarf des Unternehmens, desto höher ist die Netzebene und desto geringer die für die Netznutzung zu entrichtenden Tarife. Da es hier zu großen Unterschieden kommen kann, wird bei allgemeinen Betrachtungen mit den Preisen in Tabelle 6 gerechnet wird, ansonsten werden die Preise der jeweiligen Unternehmen eingesetzt.

Tabelle 6: Überblick über die verwendeten Strom- und Gaspreise

		hohes Preisverhältnis	niedriges Preisverhältnis
Gas	€/kWh	0,030	0,025
Strom	€/kWh	0,105	0,050
Preisverhältnis		3,5	2,0

Die Amortisationszeit wurde ohne Berücksichtigung von Zinsen und mit den Investitionskosten, die die Ochsner Energietechnik GmbH für die beiden entwickelten Wärmepumpen angegeben hat, berechnet. Beim Gaskessel wurde mit spezifischen Kosten von 100 €/kW Heizleistung gerechnet (Tabelle 7).

Tabelle 7: Vorläufige Investitionskosten, ermittelt auf Basis der beiden Funktionsmuster

		Einstufige WP	Zweistufige WP	Gaskessel
Investitionskosten	€	110000	169000	-
Spezifische Kosten	€/kW	345	550	100

Die Wärmegestehungskosten wurden für einen Zeitraum von 20 Jahren nach der VDI Richtlinie 2067 ermittelt [5]. Es wurden dazu Kapitalkosten nach der Annuitätenmethode mit einem Zinssatz von 4% berechnet. Außerdem wurden Betriebskosten basierend auf den Preisen in Tabelle 6 und Instandsetzungs-, Wartungs- und Inspektionskosten basierend auf Tabelle 8 berücksichtigt. Die jährlichen Instandsetzungs-, Wartungs- und Inspektionskosten für den Gaskessel wurden der VDI Richtlinie entnommen. Für die Wärmepumpe wurde auf Angaben der Ochsner Energietechnik GmbH zurückgegriffen.

Tabelle 8: Kosten für Instandsetzung, Wartung und Inspektion

		Einstufige WP	Zweistufige WP	Gaskessel
Instandsetzung, Wartung, Inspektion	% Investition	2,2	2,7	3,5

2.6.2 Systemsimulationen mit der einstufigen Wärmepumpe

Da das parametrisierte Wärmepumpenmodell alle Versuchspunkte enthält, kann es Betriebszustände, die zwischen den Versuchspunkten liegen, interpolieren. Daher werden nun verschiedene Anwendungen der einstufigen Wärmepumpe mit IPSE berechnet. Die Quelltemperatur wurde im Bereich von 45 und 60°C variiert. Industrielle Wärmequellen in diesem Temperaturbereich sind beispielsweise Kühlwasser

von Maschinen und hydraulischen Anlagen, Abwärme von Kälteanlagen, sowie warme Abluftströme, die derzeit nicht genutzt werden. Die Wärmenutzungstemperatur wurde von 80 bis 130°C variiert. Die Wärmepumpe liefert warmes Wasser, das als Prozesswasser zum Beispiel in der Papierindustrie, der Kunststoff- oder Metallverarbeitung eingesetzt werden kann. Weitere Anwendungen sind Reinigungsanlagen, Kochen, Pasteurisieren und Trocknungsprozesse in der Lebensmittelindustrie [6], [7], [8], [9]. Es kann auch Fernwärme ausgekoppelt werden. Je nach zeitlicher Übereinstimmung von Wärmequelle und Nutzung kann ein Speicher erforderlich sein.

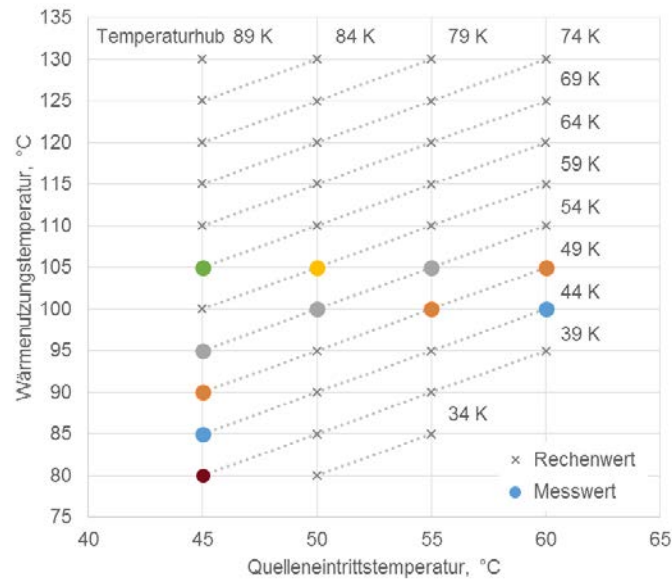


Abbildung 14: Simulierte Betriebspunkte

In Abbildung 14 werden die dabei errechneten Zustände als Kreuze und die gemessenen Betriebspunkte als Punkte dargestellt, als Scharparameter dient der Temperaturhub. Da die Messungen zur Modellbildung nur bis 105 °C durchgeführt wurden, handelt es sich bei den Betriebspunkten über 105 °C um Extrapolationen, die mit größerer Unsicherheit behaftet sind. Die untere Einsatzgrenze des Modells liegt bei einem Temperaturhub von 39 K. Beträgt der Temperaturhub 34 K, wird ebenfalls extrapoliert. Bei Quelleneintrittstemperaturen von 60 °C liefert das Modell bei diesem Temperaturhub keine sinnvollen Ergebnisse mehr.

2.6.2.1 Simulationsergebnisse

Abbildung 15 zeigt die elektrische Leistung und die Heizleistung der Wärmepumpe bei verschiedenen Quellen- und Wärmenutzungstemperaturen. Der Strombedarf nimmt mit der Wärmenutzungstemperatur zu, bei konstanter Quellentemperatur steigt auch der Temperaturhub. Bei einer Wärmenutzungstemperatur von 130°C ist der Strombedarf ungefähr doppelt so groß wie bei 80 °C. Die Heizleistung nimmt dagegen ab und liegt je nach Betriebspunkt zwischen 250 und 400 kW. Man kann davon ausgehen, dass die lineare Korrelation im Bereich der hohen Wärmenutzungstemperaturen, wo extrapoliert wird, die Heizleistung über- und die elektrische Leistung unterschätzen. Die Heizleistung wird stärker abnehmen und die elektrische Leistung stärker zunehmen, als in Abbildung 15 gezeigt wird. Der COP (Leistungszahl) ist das Verhältnis von Heizleistung und Strom. Er nimmt mit steigendem Temperaturhub ab und liegt zwischen 1,7 und 4,2.

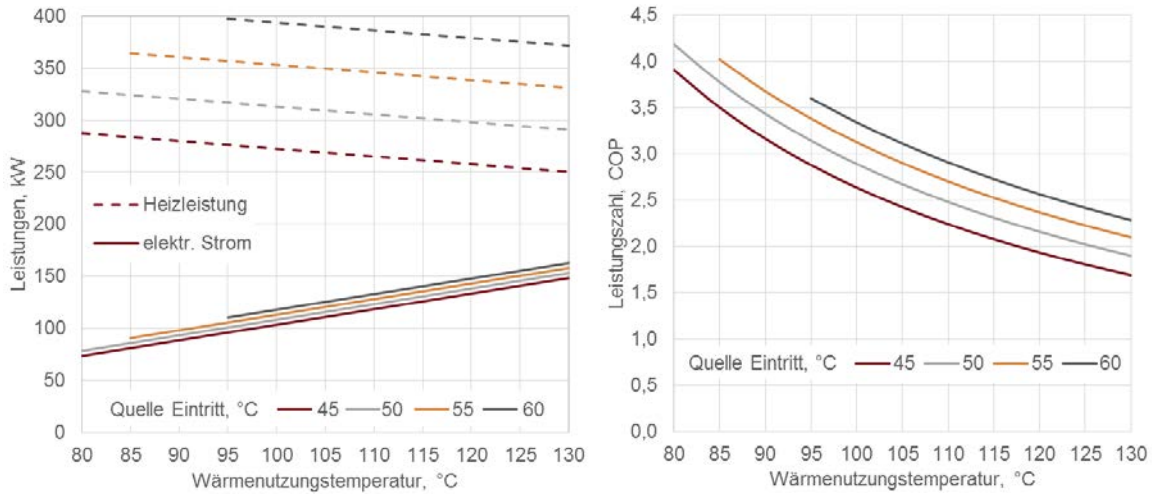


Abbildung 15: Elektrische Leistung, Heizleistung und Leistungszahl (COP) der Wärmepumpe

2.6.2.2 Techno-ökonomische Bewertung

Für die Betrachtung der Umweltauswirkungen werden die CO₂-Emissionen und der Primärenergieeinsatz der Wärmepumpe berechnet und einem erdgasbefeuerten Kessel, der die gleiche Heizleistung liefert und einen thermischen Wirkungsgrad von 90% hat, gegenübergestellt. Zur Beurteilung der Energiekosten ist das Preisverhältnis von elektrischem Strom und Gas maßgeblich, es werden die Preisverhältnisse aus Tabelle 6 verwendet. Die möglichen Einsparungen werden als Stundenwerte angegeben. Je nach Art des Prozesses ergeben sich unterschiedliche Jahresbetriebsstunden (ganzjährig, saisonal, tagsüber, etc.). Typische Werte liegen zwischen 3000 und 8500 h.

Der Einsatz der Wärmepumpe hat in jedem Betriebspunkt positive Auswirkungen auf die Umwelt, was in Abbildung 16 verdeutlicht wird. Es werden zwischen 24-76 kg CO₂/h gespart, das entspricht 35-74% der Emissionen für die Wärmebereitstellung. Die Primär- und Endenergieeinsparung sind bei geringen Wärmenutzungstemperaturen ähnlich hoch. Bei hohen Temperaturen nimmt die Primärenergieeinsparung ab, da zur Erzeugung von Strom mehr Primärenergie benötigt wird als zur Bereitstellung von Gas. Die Einsparungen betragen 63–324 kWh/h (= 19-67 %) Primärenergie und 130-331 kWh/h (= 47-78%) Endenergie.

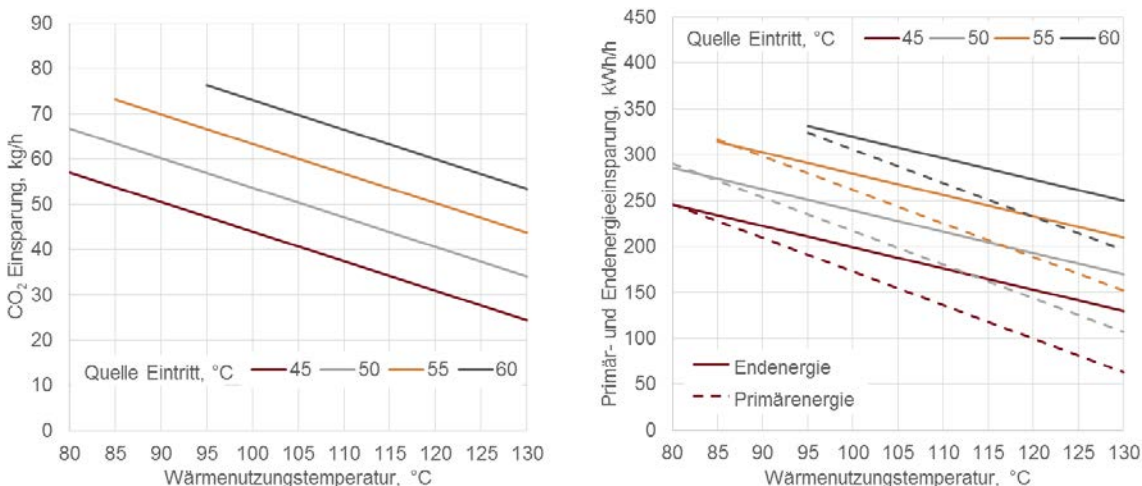


Abbildung 16: Stündliche CO₂-, Primär- und Endenergieeinsparungen bei Betrieb der Wärmepumpe

Die Wärmepumpe führt in den meisten Fällen zu einer Reduktion der laufenden Energiekosten. Sie können um bis zu 6 €/h oder 60 % der Kosten reduziert werden. Lediglich bei einem hohen Preisverhältnis sind hohe Wärmenutzungstemperaturen nicht mehr wirtschaftlich (Abbildung 17). Bei niedrigen Wärmenutzungstemperaturen können die Energiekosten durch die Wärmepumpe um bis zu 30 % gesenkt werden.

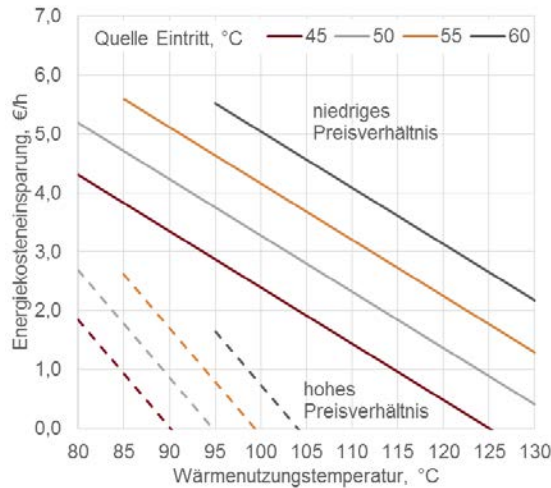


Abbildung 17: Stündliche Energiekosteneinsparung bei Betrieb der Wärmepumpe

Bei hohen Quellentemperaturen und geringem Temperaturhub werden bei allen Parametern der techno-ökonomischen Analyse die höchsten Einsparungen erzielt. Dabei ist auch die Heizleistung am höchsten.

2.6.3 Molkerei Abwärmenutzung

Für die Anwendung der zweistufigen Wärmepumpe werden zwei Wärmepumpen für die ESL- und UHT-Erhitzung in einer Molkerei betrachtet. Neben anderen Produkten werden jeweils 50000 l/h UHT-Milch und 50000 l/h ESL-Milch hergestellt. Um die Produkte auf die jeweilige Lagertemperatur abzukühlen, wird Prozesskälte mit einer NH₃-Kälteanlage erzeugt. Der Kondensator der NH₃-Kälteanlage, der die Abwärme an die Umgebung abgibt, kann durch die Wärmepumpe als Wärmequelle genutzt werden. Die Molkerei wird in IPSEpro abgebildet, das Fließbild umfasst die Milchströme, die Kältemaschine, das Heißwasser und die Wärmepumpen (Abbildung 18). Die Milch wird zunächst von der bereits verarbeiteten Milch vorgewärmt und in zwei Wärmetauschern erhitzt. Der erste Wärmetauscher wird mit Heißwasser von der Wärmepumpe beheizt, der zweite mit Heißwasser, das vom Dampfkessel bereitgestellt wird. Die verarbeitete Milch wird nach dem Milchwärmetauscher mit Eiswasser auf die jeweilige Lagertemperatur (ESL-Milch 3 °C, UHT-Milch 20°C) gekühlt. Die Kältemaschine wird als Black-Box abgebildet. Die Kühl- und Heizleistungen, sowie der Strombedarf wird an Hand von Herstellerangaben zum EER (Energy Efficiency Ratio, Leistungszahl der Kältemaschine) berechnet. Auf Grund des großen Temperaturhubs (ca. 100°C) wird hier die zweistufige Wärmepumpe eingesetzt und mit dem Grey-Box-Modell, das in Kapitel 2.5.2 beschrieben wurde, simuliert. Milch wird näherungsweise als Wasserstrom gerechnet, da keine detaillierten Stoffdaten für IPSEpro vorliegen. Um die unterschiedlichen Wärmekapazitäten von Milch und Wasser zu berücksichtigen, wird der Wassermassenstrom mit einen Korrekturfaktor von 0,95 multipliziert.

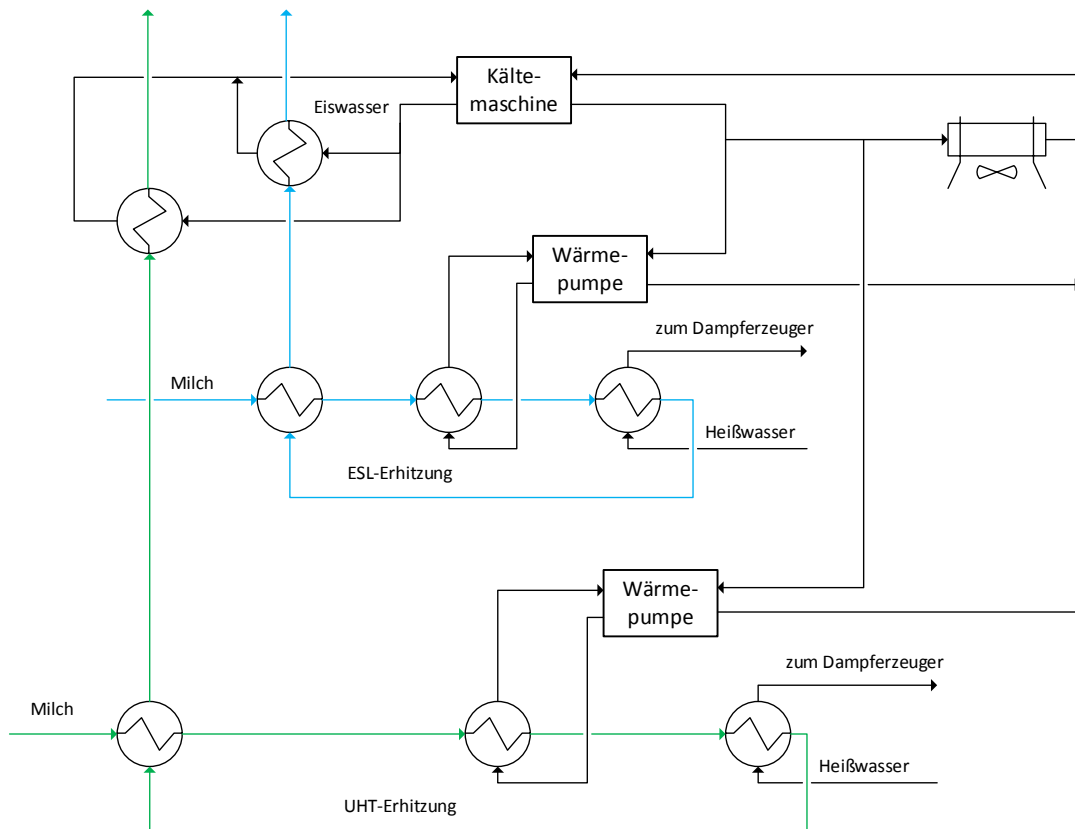


Abbildung 18: Molkereiprozess mit Wärmepumpen, Abwärmenutzung

2.6.3.1 Simulationsergebnisse

In Tabelle 9 werden die wichtigen Simulationsergebnisse zusammengefasst. Der Ist-Stand der beiden Prozesse ist die Situation ohne Wärmepumpe, wo die Milch mit Heißwasser auf 120 °C (ESL) und 138 °C (UHT) erhitzt wird. Durch die Integration der Wärmepumpen wird die Milch auf 107°C beim ESL-Prozess und auf 124 °C beim UHT Prozess vorgewärmt. Die Wärmepumpen liefern rund 32% der Leistung, die für die Erhitzung nötig ist. Der COP der Wärmepumpen liegt bei 1,9 bzw. bei 1,7.

Tabelle 9: Simulationsergebnisse Molkereiprozess mit zwei Wärmepumpen, Abwärmenutzung

		UHT	UHT+WP	ESL	ESL+WP
Gas für Heißwasser	kW	1386	849	1341	813
Anteil WP an Erhitzung	%		32		33
Heizleistung WP	kW		399		394
Kühlleistung WP	kW		158		189
Stromverbrauch WP	kW		241		205
COP Wärmepumpe			1,65		1,92

Beim ESL-Prozess wird die Wärmepumpe bei niedrigerer Wärmenutzungstemperatur betrieben und ist daher effizienter. Es wird deutlich weniger Strom bei kaum verringerter Heizleistung benötigt. Die Kühlleistung der Wärmepumpen beträgt ca. 360 kW, was nur einen kleinen Teil der Abwärme der

Kältemaschine ausmacht. In Abbildung 19 werden auf der rechten Seite die Heizleistung des Gaskessels ohne Wärmepumpe und die elektrische Leistung der Wärmepumpe und die verbleibende Leistung des Gaskessels gegenübergestellt.

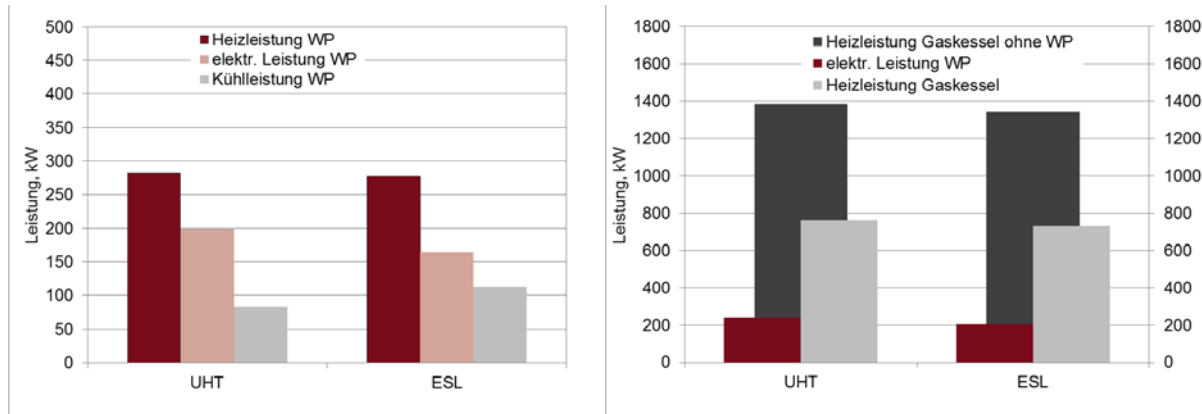


Abbildung 19: Überblick über Leistung der Wärmepumpen, Abwärmenutzung

2.6.3.2 Techno-ökonomische Bewertung

Die CO₂- und Primärenergieeinsparungen wurden wieder mit den Faktoren für Österreich im Jahr 2011 berechnet. Die Integration der Wärmepumpe hat in beiden Fällen positive Auswirkungen auf die Umwelt. Es werden ca. 20% der CO₂-Emissionen und rund 25% des Primärenergiebedarfs vermieden. Bei der Herstellung von ESL-Milch fallen die Einsparungen größer aus.

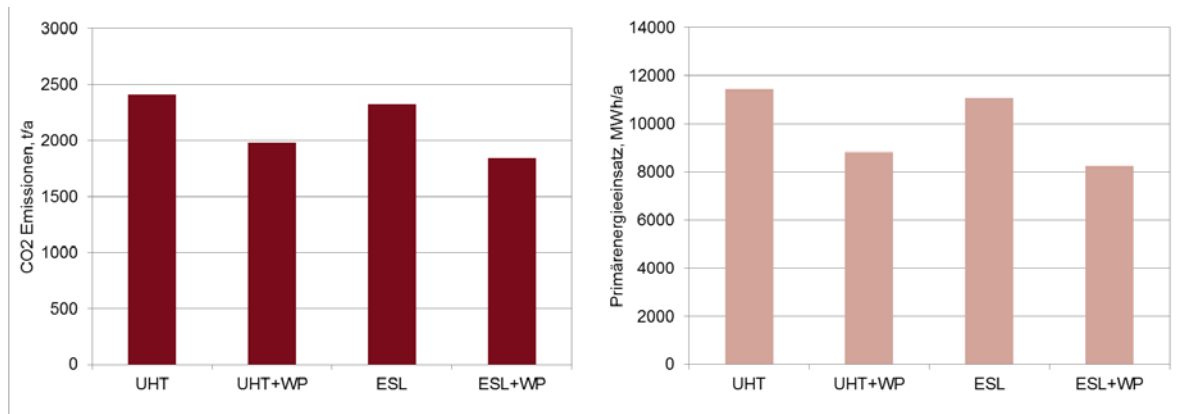


Abbildung 20: Jährliche CO₂- und Primärenergieemissionen, Abwärmenutzung

Die wirtschaftlichen Betrachtungen werden an Hand von unterschiedlichen Preisverhältnisse durchgeführt, die Molkerei hat rund 7000 h/a Betriebsstunden. Wie in Abbildung 21 ersichtlich ist, führen die Wärmepumpen beim hohen Preisverhältnis zu einer Energiekostensteigerung, es gibt daher auch keine Amortisationszeit. Bei einem niedrigen Preisverhältnis können geringe Einsparungen erzielt werden, die Amortisationszeit liegt jedoch bei 8 bzw. 17 Jahren, was üblicherweise für eine positive Investitionsentscheidung zu hoch ist. In die Wärmegestehungskosten gehen auch die Wartungskosten und Kapitalkosten der Investition ein. Wird Wärme nur mit dem Gaskessel bereitgestellt, betragen die Wärmegestehungskosten je nach Gaspreis 29 - 35 €/MWh. Im Unterschied zu den reinen Energiekosten zeigen die Wärmegestehungskosten, dass die Energiekosteneinsparung nicht ausreicht, um die Kapital-

und Wartungskosten abzudecken. Auch beim ESL-Prozess betragen die Wärmegestehungskosten 31 €/MWh und sind höher als beim Gaskessel.

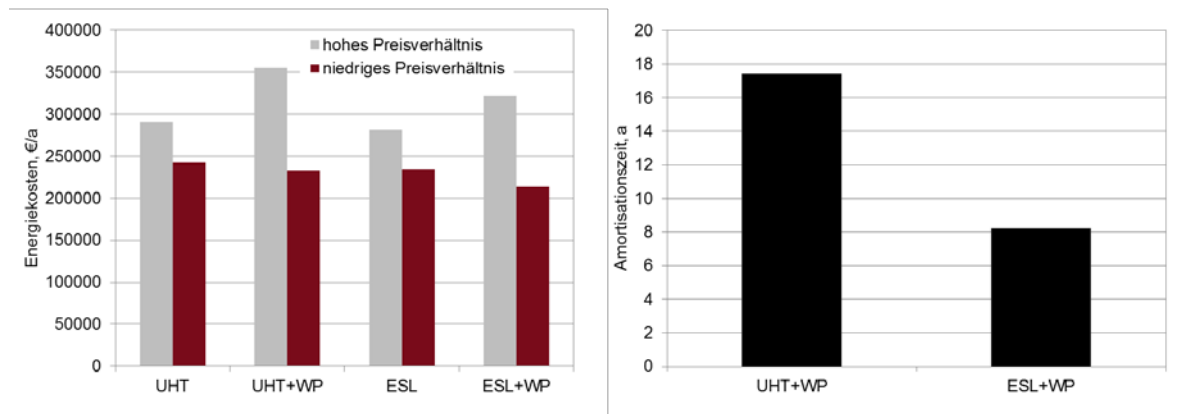


Abbildung 21: Energiekosten und Amortisationszeit (niedriges Preisverhältnis), Abwärmenutzung

Tabelle 10: Wärmegestehungskosten Molkereiprozess, Abwärmenutzung

		UHT	UHT+WP	ESL	ESL+WP
Hohes Preisverhältnis	€/MWh	34,9	46,8	34,9	44,0
Niedriges Preisverhältnis	€/MWh	29,3	33,9	29,3	31,2

2.6.4 Molkerei: Heizen und Kühlen

Wärmepumpen können besonders effizient betrieben werden, wenn sie zum gleichzeitigen Heizen und Kühlen eingesetzt werden. Im Fall der Molkerei aus Kapitel 2.6.3 kann die Wärmepumpe auch zur Entlastung der Kältemaschine verwendet werden. Dadurch wird zwar der Temperaturhub der Wärmepumpe größer, die Kältemaschine muss aber weniger Kühlleistung bereitstellen. Diese Variante wird im Folgenden beschrieben.

2.6.4.1 Prozessbeschreibung und Fließbild

Abbildung 22 zeigt das veränderte Simulationsfließbild. Die Wärmepumpen werden in den Eiswasserkreis integriert und kühlen das Eiswasser nach den Milchwärmetauschern. Die Kältemaschine liefert die restliche Kühlleistung, die für den Betrieb erforderlich ist.

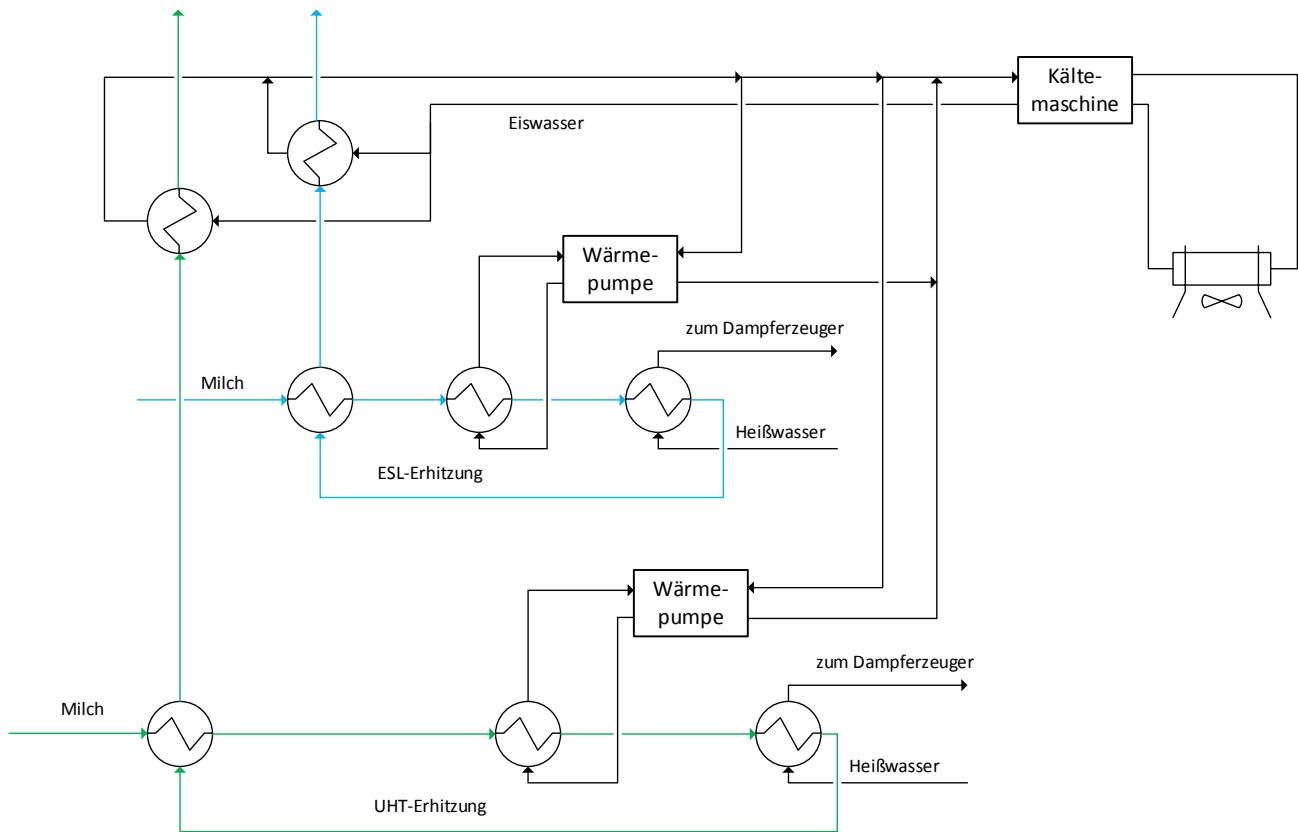


Abbildung 22: Molkereiprozess mit Wärmepumpen, Heizen und Kühlen

2.6.4.2 Simulationsergebnisse

In Tabelle 11 werden die wichtigen Simulationsergebnisse zusammengefasst. Die Wärmepumpen leisten durch die Integration in den Eiswasserkreis einen größeren Temperaturhub, dadurch verändert sich der Betriebspunkt im Vergleich zur Variante der Abwärmenutzung. Die Milch wird nun beim ESL-Prozess auf 105°C (zuvor 107°C) und beim UHT-Prozess auf 123°C (zuvor 124°C) vorgewärmt. Die Wärmepumpen liefern damit rund 22% der Leistung, die für die Erhitzung nötig ist. Der COP der Wärmepumpen nimmt deutlich ab und liegt bei 1,4 bzw. bei 1,7.

Tabelle 11: Simulationsergebnisse Molkereiprozess mit zwei Wärmepumpen, Heizen und Kühlen

		UHT	UHT+WP	ESL	ESL+WP
Gas für Heißwasser	kW	1386	978	1341	942
Strom für Kältemaschine	kW	61	53	248	217
Anteil WP an Erhitzung	%		23		23
Heizleistung WP	kW		282		278
Kühlleistung WP	kW		83		113
Stromverbrauch WP	kW		199		165
COP Wärmepumpe			1,42		1,68

Im Vergleich zur Abwärmenutzung nehmen Heiz- und Kühlleistung, sowie die elektrische Leistung der Wärmepumpen ab. Der Strombedarf der Kältemaschine wird geringer, es wird aber mehr Gas für die Bereitstellung von Heißwasser benötigt. Abbildung 23 zeigt einen Überblick über die Leistung der Wärmepumpe.

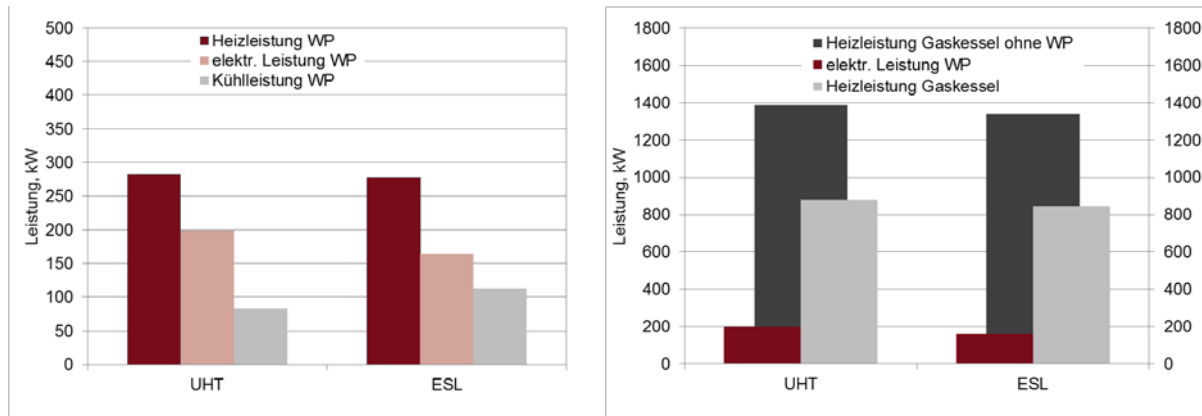


Abbildung 23: Überblick über Leistung der Wärmepumpen, Heizen und Kühlen

2.6.4.3 Techno-ökonomische Bewertung

Da nun der Stromverbrauch der Kältemaschine mitbetrachtet wird, sind die in Abbildung 24 dargestellten CO₂-Emissionen und Primärenergienmengen höher als in Abbildung 20. Die Einsparungen fallen geringer aus, weil der Betrieb der Wärmepumpen nun mehr Strom benötigt und die Stromeinsparung der Kältemaschinen deutlich geringer ist. Es werden ca. 12% der CO₂-Emissionen und rund 16% des Primärenergiebedarfs vermieden. Bei der ESL-Milch fallen die Einsparungen größer aus.

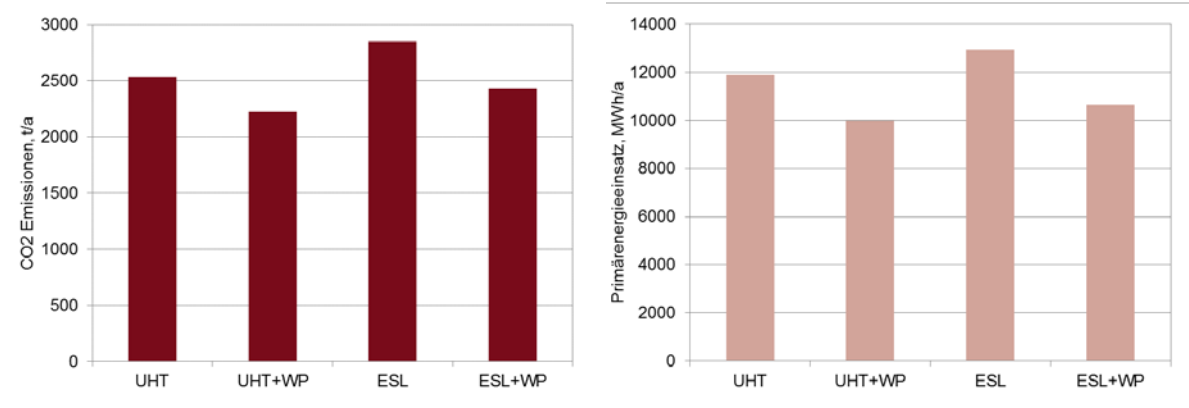


Abbildung 24: Jährliche CO₂- und Primärenergienmengen, Heizen und Kühlen

Abbildung 25 zeigt, dass auch bei Heizen und Kühlen nur das niedrige Preisverhältnis wirtschaftlich ist. Die Amortisationszeit nimmt beim ESL-Prozess im Vergleich zur Abwärmenutzung etwas ab und beträgt nun 7 Jahre. In der Regel werden allerdings niedrigere Amortisationszeiten von unter drei Jahren gefordert. Beim UHT-Prozess nimmt die Amortisationszeit allerdings stark zu und steigt auf 37 Jahre. Da die UHT-Milch bei höheren Temperaturen gelagert werden kann, ist hier der Anteil der Kühlung am Gesamtenergieaufwand deutlich geringer. Die Wärmegestehungskosten liegen ebenfalls über denen des Gaskessels (Tabelle 12). Daher wiegt der Kühlnutzen nicht auf, dass der Betrieb der Wärmepumpen durch die deutlich kältere Quelle ineffizienter geworden ist.

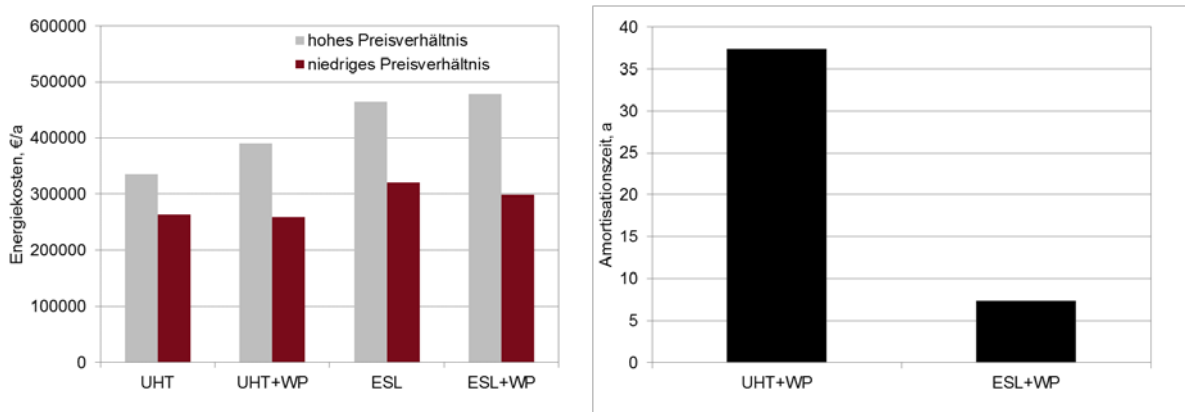


Abbildung 25: Energiekosten und Amortisationszeit (niedriges Preisverhältnis), Heizen und Kühlen

Tabelle 12: Wärmegestehungskosten Molkereiprozess, Heizen und Kühlen

		UHT	UHT+WP	ESL	ESL+WP
Hohes Preisverhältnis	€/MWh	34,9	46,4	34,9	43,8
Niedriges Preisverhältnis	€/MWh	29,3	40,3	29,3	36,2

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse des Projekts können als sehr erfolgreich gewertet werden und werden im Folgenden näher beschrieben.

3.1 Einsatzgebiete für Wärmepumpen mit 130°C Senktemperatur

Es konnten eine Reihe von Anwendungsfällen evaluiert werden, bei denen Abwärme ungenutzt an die Umwelt abgegeben wird und andererseits Medientemperaturen von bis zu 130°C benötigt werden. Durch den Einsatz der mit diesem Projekt entwickelten, gebauten und getesteten Funktionsmustern können diese Abwärmeströme genutzt werden und dem Prozesskreislauf mit einem Temperaturniveau von 130°C wieder zugeführt werden. Damit erfolgt einerseits eine entsprechende Energieersparnis, andererseits wird die Umweltbelastung durch Wiederverwertung der Abwärmeströme entsprechend vermindert.

3.2 Beispielanwendungen für 130°C Wärmepumpen in Industrieprozessen:

Für die Einbindung von Hochtemperatur-Wärmepumpen in Industrieprozesse sind allerdings einige Regeln zu beachten und auch die richtigen Voraussetzungen zu schaffen.

Es darf der Industrieprozess in keiner Weise negativ beeinflusst werden, da es ansonsten zu Störungen im Produktionsprozess kommen könnte. Für die Einbindung in das System sind Hydraulik und Regelung von großer Bedeutung, da diese speziell bei hochintegrierten Prozessen entscheidend für die Effizienz

der Wärmepumpe sein können. Im Kapitel 2.1 wurde im Rahmen der Prozessanalysen schon ausführlich auf die verschiedenen Anwendungsszenarien eingegangen. Die nachstehende Auflistung fasst nochmals besonders interessante Anwendungen für 130°C Hochtemperatur-Wärmepumpen zusammen:

- Papierindustrie: Abwärmequellen wie Schwarzlauge, Abwasser, feuchte Abluft der Papiermaschine, Nutzung für die Produktion von Niederdruckdampf oder zur Einspeisung in ein Fernwärmenetz
- Lebensmittelverarbeitende Industrie (Molkereien, Schlachthöfe, Getränkeindustrie , u. ä): Abwärme von Kältemaschinen, Nutzung für die Produktion von Heißwasser bzw. Dampf
- Energiedienstleister: Abwärme aus der Dampfturbine und anderen Maschinen, Nutzung zur Einspeisung in das Fernwärmenetz

3.3 Prozesssimulation und techno-ökonomische Bewertung

Für die beiden Wärmepumpen, die in *Hotpump Reloaded* entwickelt wurden, wurden stationäre Simulationsmodelle erstellt, mit dem der Einsatz dieser Wärmepumpen in Industrieprozessen berechnet werden kann. Die Modellbildung beruht auf einem Kennfeld, das in Prüfstandsmessungen erhoben wurde. Die Wärmepumpen können durch den gewählten Modellbildungsansatz gut nachgebildet werden. Wesentliche Parameter der Wärmepumpen, wie die Heizleistung und die elektrische Leistung, wurden in den Modellen berechnet. Dazu wurden zusammengesetzte lineare Funktionen in Abhängigkeit von der Wärmenutzungstemperatur und dem Temperaturhub integriert. Die Modelle geben die Messdaten mit sehr guter Genauigkeit wieder und wurden zur Berechnung von zwei möglichen Anwendungsfällen, sowie für weitere Betriebszustände, die für industrielle Anwendungen geeignet sind, eingesetzt. An Hand der Simulationsergebnisse kann die Effizienzsteigerung nach techno-ökonomischen Kriterien bewertet werden, die eine wichtige Entscheidungsgrundlage für eine mögliche Umsetzung darstellt. In allen berechneten Betriebspunkten haben die Wärmepumpen positive Auswirkungen auf die Umwelt, da die CO₂-Emissionen und der Primärenergiebedarf deutlich verringert werden. Es kann vielfach auch eine Betriebskosteneinsparung erzielt werden.

3.4 Erfolgreiche Tests der Funktionsmuster mit 130°C Senken Temperatur

Die beiden Funktionsmuster haben bei den verschiedenen Labortests hohe Funktionalität bewiesen (Auszug aus den Prüfprotokollen siehe Kapitel 2.4). Sowohl das einstufige Funktionsmuster, als auch das zweistufige Funktionsmuster konnte am Ochsner Industrierärmepumpen Prüfstand mit unterschiedlichen Quell- und Senktemperaturen im Dauerbetrieb ausführlich getestet und dabei Maßnahmen für die weitere Optimierung definiert werden.

Die Quelltemperaturen für das einstufige Funktionsmuster waren bei den Tests mit 60°C bis 45°C definiert, die Senktemperaturen mit 85°C bis 130°C.

Das zweistufige Funktionsmuster wurde mit Quelltemperaturen von 20°C bis 10°C und Senktemperaturen von 100°C bis 130°C betrieben.

In allen Betriebszuständen liefen die beiden Funktionsmuster stabil. Auch das Anfahr-Verhalten und das Abschalt-Verhalten wurden ausführlich getestet und es wurden dabei auch weitere Optimierungsmaßnahmen für die Regelung und Steuerung definiert. Diese ist gerade beim zweistufigen Funktionsmuster eine besondere Herausforderung, da die Lastverteilung zwischen den beiden Kältekreisläufen besondere Maßnahmen erfordert.

4 Ausblick und Empfehlungen

Mit diesem Forschungsprojekt wurde gezeigt, dass Hochtemperatur-Wärmepumpen Medientemperaturen von 130°C erzeugen können. Dabei liegen die Leistungszahlen je nach Quelltemperatur im Bereich von 1,8 bis 3.

Bei dem derzeitigen Verhältnis zwischen Strompreis und dem Preis fossiler Energieträger ist dies aber oft noch nicht ausreichend, um die von der Industrie oftmals gewünschte Amortisationsdauer von unter drei Jahren zu erreichen.

Erschwerend kommt hinzu, dass Emissionseinsparungen noch nicht monetär bewertet werden, wie beispielsweise die niedrigen Preise des CO₂-Emissionshandels zeigen. Daher stellen die positiven Auswirkungen auf die Umwelt auch keinen Anreiz für eine weitere Marktdurchdringung dar. Finanzielle Anreize für CO₂-Einsparungen und gesteigerte Energieeffizienz, sowie Investitionsförderungen können umweltschonenden Energieerzeugungstechnologien wie der Wärmepumpe auch in der Industrie zum Durchbruch verhelfen.

Die Prozessanalysen haben gezeigt, dass Industriebetriebe durchaus Interesse an Hochtemperatur-Wärmepumpen haben, da durch die höheren Wärmenutzungstemperaturen viele neue Anwendungsfelder erschlossen werden können. Eine weitere Umsetzungsbarriere stellen die noch nicht vorhandenen Referenzanlagen dar, die zeigen, dass Wärmepumpen in der Industrie zuverlässig und effizient eingesetzt werden können. Daher ist es auch ein Ziel, erste Anlagen im Feld zu verwirklichen, damit auf entsprechende Referenzen verwiesen werden kann.

4.1 Zukünftige Vermarktungsaktivitäten

Basierend auf den erfolgreichen Tests der beiden Funktionsmuster werden im nächsten Schritt technische und kaufmännische Vorabunterlagen erstellt. Dabei werden auch weitere Baugrößen entwickelt, damit für reale Referenzanwendungen in der Praxis entsprechende Auslegungsdaten verfügbar sind. Damit soll es möglich werden, Interessenten für konkrete Musteranlagen zu gewinnen.

4.2 Weiterführende F&E Aktivitäten

4.2.1 Erprobung von Low GWP Kältemittel (GWP nahe 0)

Die nächsten Schritte werden die Evaluierung von Kältemitteln mit sehr geringem GWP nahe 0 sein. Die bereits produzierten Wärmepumpenmuster sollen mit anderen low GWP Kältemitteln getestet werden und auf Basis der Testergebnisse nach Notwendigkeit entsprechend optimiert werden.

4.2.2 Maßnahmen zur weiteren Optimierung des COP

Ebenso sollen weitere Maßnahmen diskutiert werden, um die Verluste des gesamten Kältekreislaufs weiter zu verringern und damit den COP weiter zu erhöhen, um möglichst nahe an die theoretische Effizienz des Carnotprozesses heran zu kommen.

Dies kann sowohl in Bezug auf die Regelbarkeit als auch das Anlaufverhalten, bzw. das Abschaltverhalten erfolgen. Ebenso wird man die einzelnen Komponenten bezüglich weiterer Optimierungen untersuchen müssen.

4.2.3 Maßnahmen zur Erhöhung der Flexibilität

Um die Flexibilität zu erhöhen, muss die Zeitspanne bis zum optimalen Betriebszustand des Kältekreislaufes wesentlich verkürzt werden. Denn erst ab dem optimalen Betriebszustand arbeitet die Maschine mit dem ausgelegten COP. Wenn es gelingen würde, diese Anlaufzeit, und genauso die Abschaltzeit auf 10 bis 20 sec zu verkürzen, dann könnte für den Betrieb auch Überschussstrom eingesetzt werden. Die Maschine könnte auch Regelenergie (Power-to-Heat Konzept) bereitstellen. Damit würde sich das Einsatzgebiet nochmals sehr stark vergrößern, da die Wirtschaftlichkeit stark steigen würde, bzw. die Amortisationsdauer stark verkürzt werden würde.

5 Publikationen

V. Wilk, T. Fleckl. Increasing energy efficiency in pulp and paper industry by advanced heat pumps. 10th European Congress of Chemical Engineering, Nice, France (2015).

V. Wilk, M. Hartl, T. Fleckl, E. Widhalm, F. Ramler, G. Adelberger, T. Ciepiela, K. Ochsner sen. Hochtemperatur-Wärmepumpen für Industrieanwendungen: Prüfstandsmessungen und Systemsimulation, DKV Tagung 2016, Kassel, Deutschland (2016).

Lucas Brändle, Diplomarbeit, TU Wien (laufend)

tab Das Fachmedium der TGA-Branche: Hochtemperatur-Wärmepumpen für Industrieanwendungen, Veröffentlichung voraussichtlich im April 2017.

Fachmagazin brr (Leitungsbau, Brunnenbau und Geothermie), Einsatz von Wärmepumpen in der Brauerei, DI. Karl Ochsner, Veröffentlichung Februar 2017

6 Literaturverzeichnis

- [1] Prüfstand Messungen nach EN14511 bis 800 kW thermische Leistung
- [2] Wagner, W., Kruse, A.: Properties of Water and Steam, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1998
- [3] Simtech Simulation Technology, IPSEpro Process Simulator Refrigeration Process Library,

Manual Version 4.0.000, 2003

- [4] Globales Emissions-Modell integrierter Systeme GEMIS Österreich, Gas-Kessel-A-Konversionsfaktoren und GEMIS. EI-KW-Park-A+Importe-2011, 2013.
- [5] VDI 2067, Blatt 1, Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung, September 2012.
- [6] Wolf, S., Fahl, U., Blesl, M., Voß, A., Jakobs, R. Analyse des Potenzials von Industriewärmepumpen in Deutschland, 2014.
- [7] Wilk, V., Hartl, M., Fleckl, T., Priesner, R., Haimer, E., Wastyn, M., Erhöhung der Energieeffizienz industrieller Trocknungsprozesse durch den Einsatz von Wärmepumpen, 14. Symposium Energieinnovation, TU Graz, Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation, Graz, 2016.
- [8] Hartl, M., Lauermann, M., Fleckl, T., Rittenschober, B., Kontomaris, K., Hochtemperaturwärmepumpen mit HFO-1336mzz-Z als Kältemittel für industrielle Produktionsprozesse mit alternierender Heiz- und Kühlanforderung, DKV-Tagung 2015, Dresden, AA IV.16.
- [9] Wilk, V., Fleckl, T., Fluch, J., Brunner, C., Muster-Slawitsch, B., Lange, D., Wertz, D., Ponweiser, K., Solarthermie und Wärmepumpen zur Steigerung der Energieeffizienz von industriellen Prozessen: Erste Ergebnisse des Forschungsprojekts "EnPro", Gleisdorf Solar 2016, AEE INTEC, Gleisdorf, 2016.

7 Kontaktdaten

ProjektleiterIn: DI Karl Ochsner, DI Thomas Ciepiela

Institut/Unternehmen: OCHSNER Wärmepumpen GmbH, OCHSNER Energietechnik GmbH

Postadresse	Krackowitzerstrasse 4, A-4020 Linz
Telefon	+43 (0) 5 04245 - 110
Fax	
E-mail	karl.ochsner@ochsner.at , thomas.ciepiela@ochsner-energietechnik.com
Website	www.ochsner.at , www.ochsner-energietechnik.com

Projektpartner:

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Giefinggasse 2

1210 Vienna

www.ait.ac.at