



Masterstudiengang
„Umwelt- und Bioressourcenmanagement“
Schwerpunkt Energie

Universität für Bodenkultur, Wien

Diplomarbeit

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
„Diplomingenieur“

„Effizienzbestimmung einer Hochtemperaturwärme- pumpe“

vorgelegt von:

Bernhard Kling, BSc in Engineering

Personenkennzeichen: **01310450**

Begutachtende:

Dipl.-Ing. Dr. Magdalena Wolf, Bakk.techn.

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Tobias Pröll

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüferin/ keinem anderen Prüfer als Prüfungsleistung eingereicht. Mir ist bekannt, dass Zuwiderhandeln mit der Note „nicht genügend“ (ohne Möglichkeit einer Nachbesserung oder Wiederholung) geahndet wird und weitere rechtliche Schritte nach sich ziehen kann.

Diese Arbeit wurde neben der gedruckten Version auch auf USB-Stick zur Prüfung der o.g. Erklärung bei der zuständigen Prüferin/dem zuständigen Prüfer hinterlegt.

(Ort und Datum) (Unterschrift)

Danksagung

Mein großer Dank gilt meiner Familie, die mich immer unterstützt hat und mir ermöglicht hat, ein Studium in Wien abzuschließen. Danke für die endlosen Ratschläge und Hilfen auf meinem Weg. Danke sagen möchte ich auch an meine Babsi, die die Jahre der geographischen Distanz erduldet und mich trotzdem unterstützt und bestärkt hat. Danke für die Motivation und Kraft über die Jahre.

Ein weiterer großer Dank gilt meiner Betreuerin Frau Dipl.-Ing. Dr. Magdalena Wolf, die trotz vieler Termine immer hilfsbereit auf meine Fragen eingegangen ist und mich in die richtige Richtung geleitet hat. Eine bessere Betreuung kann man sich nicht wünschen.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Tobias Pröll, der mir ermöglicht hat, am Institut meine Arbeit zu schreiben. Ich durfte viel dazulernen und Erfahrungen sammeln und dafür möchte ich mich herzlich bedanken!

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Technologie der Hochtemperaturwärmepumpe. Die Hochtemperaturwärmepumpe stellt eine Weiterentwicklung der konventionellen Wärmepumpe dar und findet sich für verschiedene Anwendungsgebiete in verschiedenen Ausführungen.

Der erste Teil dieser Arbeit erörtert den technischen Hintergrund, den Stand der Forschung und zukünftige Herausforderungen, die bewältigt werden müssen, um diese Technologie für eine Vielzahl von industriellen Anwendungen nutzbar zu machen.

Im zweiten Teil der Arbeit werden Versuchsreihen an einer Versuchs-Hochtemperaturwärmepumpe mit R245fa durchgeführt. Bei den Versuchen werden verschiedene Quellentemperaturen (40°C - 80°C) und Senkentemperaturen (120°C - 135°C) durchlaufen. Die Daten werden ausgewertet und aufbereitet. Vorhergehende Versuche haben bereits Daten mit dem Kältemittel R365mfc generiert. Diese werden herangezogen, um einen direkten Vergleich der beiden Kältemittel im Betrieb festzustellen. Parallel zu den Versuchsdaten werden in einem Simulationsprogramm die Versuche nachgestellt, um die Qualität der Messdaten und einzelner Prozessbereiche zu evaluieren.

Die Versuchsergebnisse deuten auf eine Effizienzsteigerung des Kältemittels R245fa gegenüber R365mfc, besonders bei großen Temperaturhuben hin. Des Weiteren kann festgestellt werden, dass die Hochtemperaturwärmepumpe bei höheren Quellentemperaturen und niedrigeren Temperaturhuben effizienter arbeitet. Diese Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen aus den Simulationen. Abschließend wird ein Fazit über den Stand der Forschung und die Versuchsergebnisse gezogen und Anregungen für weiterführende Forschung gegeben.

Abstract

The focus of this master thesis is on the technology of high-temperature heat pumps. High-temperature heat pumps represent an advanced type of heat pumps that are able to be used in a variety of applications.

The first part of this thesis deals with the technical background of high-temperature heat pumps, the state of the research and future challenges, that need to be solved in order to establish a strong foundation for a widespread industrial use.

In the second part of the thesis, a series of experiments with the HTHP-test stand is conducted. These experiments have various heat sink- and source temperatures. Previous experiments with a different refrigerant already created data concerning its performance. The data of the new experiments with the new refrigerant will allow a comparison between the two refrigerants in operational use. At the same time, the HTHP is being replicated in the computer tool IPSEpro to simulate its properties. The results of the tests and simulations are compared to better understand the data and certain process sections.

The data suggests an efficiency increase of the refrigerant R245fa over the refrigerant R365mfc, especially for larger temperature differences between heat source and sink. A higher efficiency can be observed when the temperature range between heat source and sink gets smaller. The results coincide with simulation results. Ultimately, a summary is given, recapitulating the state of research and the test results. In addition to that, impulses for further research are given.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
2	Technische Grundlagen	12
2.1	Thermodynamische Grundlagen	12
2.1.1	Thermodynamische Systeme	12
2.1.2	Zustandsgrößen und Prozessgrößen	13
2.1.3	Intensive und Extensive Zustandsgrößen.....	13
2.1.4	Thermische Zustandsgrößen.....	14
2.1.4.1	Druck p	14
2.1.4.2	Temperatur T	15
2.1.4.3	Volumen V	16
2.1.4.4	Zustandsdiagramme	16
2.1.5	Energie und Arbeit	17
2.1.5.1	Mechanische Energie.....	17
2.1.5.2	Innere Energie und Enthalpie	17
2.1.5.3	Wärme Q	18
2.1.5.4	Entropie S	18
2.1.5.5	Anergie und Exergie.....	19
2.1.5.6	Arbeit W	19
2.1.5.7	Leistung P	20
2.1.6	Normen und Kennzahlen.....	20
2.1.6.1	Normen	20
2.1.6.2	Carnot Faktor	20
2.1.6.3	Leistungszahl	21
2.1.6.4	Exergetischer Wirkungsgrad	22
2.1.6.5	Jahresarbeitszahl	22
2.1.6.6	Wirkleistungsfaktor	22
2.2	Wärmepumpen.....	23
2.2.1	Funktionsweise von Wärmepumpen.....	23
2.2.1.1	Einfache Wärmepumpen.....	23
2.2.1.2	Wärmepumpen mit rekuperativer Sauggasüberhitzung	24
2.2.2	Typisierung von Wärmepumpen.....	25
2.2.2.1	Kompressionswärmepumpen	26
2.2.2.2	Sorptionswärmepumpen	27
2.2.2.3	Thermokompressoren	29

2.2.2.4	Strahlwärmepumpen	30
2.2.2.5	Sonderformen der Wärmepumpe	31
2.2.2.6	Hochtemperatur-Wärmepumpen	32
2.3	Kältemittel	33
2.3.1	R245fa	34
2.3.2	R365mfc.....	36
3	Stand der Technik und Potential	38
3.1	Stand der Forschung.....	38
3.2	Marktübersicht.....	39
3.3	Potentielle Einsatzgebiete	41
3.3.1	Lebensmittel und Tabakindustrie.....	42
3.3.2	Papierindustrie	42
3.3.3	Chemieindustrie	42
3.3.4	Nischen	43
3.4	Forschungsbedarf und Verbesserungspotentiale	44
3.4.1	Wirtschaftlichkeit	44
3.4.2	Kältemittel	45
4	Ziel- und Forschungsfragen	47
5	Methodik.....	48
5.1	Versuchsdurchführung	48
5.1.1	Prüfstand.....	48
5.1.1.1	Hochtemperaturwärmepumpe	49
5.1.1.2	Quellenkreis	49
5.1.1.3	Senkenkreis	50
5.2	Versuche.....	51
5.2.1	Fragestellungen	51
5.2.2	Prüfnormen	52
5.2.2.1	EN 14511:2013	52
5.3	Datenauswertung.....	53
5.3.1	Python.....	54
5.4	Simulation	54
5.4.1	IPSEpro.....	54
5.4.2	Aufbau	55
6	Ergebnisse	56
6.1	Ergebnisse der Versuche	56

6.1.1	Messergebnisse	58
6.1.2	Ergebnisse der elektrischen Leistungsmessung.....	59
6.1.3	Expansionsventil	61
6.1.4	COP	62
6.2	Ergebnisse Vergleich R365mfc und R245fa	64
6.3	Ergebnisse der Simulation.....	64
7	Diskussion der Ergebnisse	68
7.1	Diskussion der Versuchsdurchführung	68
7.2	Diskussion der Versuchsergebnisse.....	68
7.2.1	Fehler und Messwertabweichungen	69
7.2.2	Elektrische Leistungsparameter	70
7.2.3	Expansionsventil	72
7.2.4	COP und Effizienz.....	72
7.2.5	Isentroper Wirkungsgrad Verdichter	73
7.3	Diskussion Vergleich R365mfc mit R245fa.....	74
7.4	Diskussion der Simulationsergebnisse	74
7.5	Abschließende Betrachtung	75
8	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	77
Verzeichnisse.....		78
Literaturverzeichnis		78
Abbildungsverzeichnis		83
Tabellenverzeichnis.....		85
Abkürzungsverzeichnis.....		86

1 Einleitung

1777 entdeckte William Cullen, ein schottischer Mediziner und Chemiker bei Experimenten mit Diethylether, dass einem Reaktionsgefäß Wärme entzogen werden kann, wenn man den Äther mit Hilfe von Unterdruck zum Verdampfen bringt. Cullen war nicht auf der Suche nach einer effizienteren Form des Heizens, sondern vielmehr auf der Suche nach neuen Möglichkeiten der Tiefkühlung. (Kunde, 2018)

Im Jahr 1834 gelang es dem amerikanischen Erfinder Jacob Perkins erstmals eine Dampfkomppressionsmaschine zur künstlichen Eisproduktion zu bauen. Man geht hier von der ersten mechanischen Kälteerzeugungsanlage aus. Damals wurde die Signifikanz dieser Erfindung jedoch verkannt. (Zogg, 2008)

1852 kam vom englischen Physiker William Thomson erstmals eine Anregung, dass Kältemaschinen auch reversibel eingesetzt werden könnten und deutlich effizienter und mit weniger Primärenergieeinsatz als herkömmliche Wärmeerzeuger Nutzwärme zur Verfügung stellen können. Doch auch seine Publikation „Heating Machine“, in der er die Vorteile der reversiblen Kompressionskältemaschine beschrieb, blieb bis ins 20. Jahrhundert wenig beachtet.

Das 20. Jahrhundert war geprägt von Zeiten der Ressourcenknappheit, hervorgerufen durch die beiden Weltkriege und die Rezession. Die Brennstoffpreise waren hoch, und so wurden Technologien vorangetrieben, die mit geringen Primärenergiebedarf auskommen, wie etwa die Wärmepumpe. Federführend war neben der Schweiz, Österreich, Deutschland und die USA. Die erste größere kommerzielle Wärmepumpe ging 1938 in Betrieb und versorgte das Züricher Rathaus mit Warmwasser für den Heizkreislauf. (Kunde, 2018)

30 Jahre später ging die erste erdgekoppelte Wärmepumpe, die eine Niedertemperatur-Fußbodenheizung versorgte in Betrieb. Dieses System wurde von dem Deutschen Klemens Oskar Waterkotte 1968 realisiert. Zehn Jahre später reagierte die Politik und das *Gesetz zur Förderung der Modernisierung von Wohnungen und zur Einsparung von Heizenergie* wurde beschlossen. Dieses Gesetz begünstigte den Einbau von Wärmepumpen und kompatiblen Heizsystemen in Wohnanlagen und kurbelten so die Entwicklung von Wärmepumpen an. (TU-Graz, 2019)

Wie in Abbildung 1 ersichtlich ist die Wärmepumpe seit den späten 1980er-Jahren in Österreich auf dem Markt vertreten. Besonders in den Anfangsjahren fand die Technologie in der Brauchwasseraufbereitung Verwendung. Der Markterfolg orientierte sich bis zu den frühen 2000er-Jahren jedoch sehr stark am Ölpreis. Die billigen Ölpreise der 1990er-Jahre führten zu einem Rückgang der Verkaufszahlen, da fossile Brennstoffe und deren Feuerungsanlagen deutlich billiger betrieben werden konnten. (Biermayr, Dißauer, Eberl, Enigl, u. a., 2020)

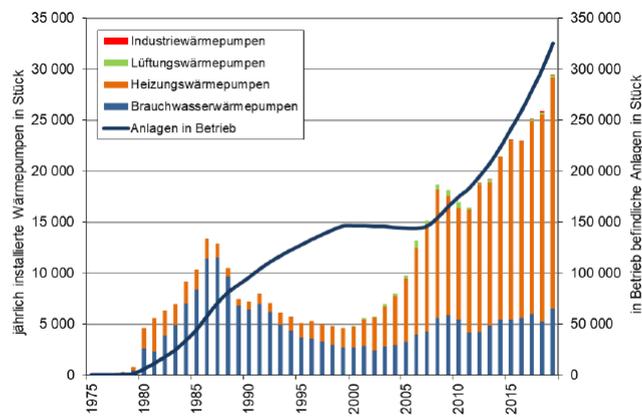


Abbildung 1: Marktentwicklung der Wärmepumpe in Österreich (Biermayr, Dißauer, Eberl, Enigl, Leonhartsberger, Maringer, Moidl, Schmidl, Strasser, Weiss, Wonisch und Wopienka, 2020)

Der Siegeszug der Wärmepumpe begann mit der Jahrtausendwende. Ressourcenorientiertes Bauen und steigende Baustandards machten Wärmepumpen für die Heizwärmebereitstellung im Wohnbau interessant. Dadurch kam es zu einem starken Wachstum der installierten Anlagen bis 20 kW Leistung.

Im Moment fokussieren sich Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen auf Integration von Wärmepumpensysteme in andere Energiesysteme. Beispiele hierfür wären Kombinationen mit Photovoltaikanlagen oder solarthermischen Anlagen. Auch die Einbindung in sogenannte „smart grids“ erhöht den Einsatzbereich dieser Technologie erheblich. (Biermayr, Dißauer, Eberl, Enigl, Leonhartsberger, Maringer, Moidl, Schmidl, Strasser, Weiss, Wonisch und Wopienka, 2020)

Eine der vielen Arten der Wärmepumpe ist die Hochtemperaturwärmepumpe. Diese Form der Wärmepumpe kann Nutzwärme über 80°C erzeugen und erschließt dieser Technologie eine breite Einsatzmöglichkeit in der Industrie. Da diese Variante der Wärmepumpentechnologie noch sehr jung ist und Standards besonders im Kühlmittelbereich sehr hoch sind, gibt es noch eine Vielzahl von Herausforderungen, die sich Hochtemperaturwärmepumpen stellen müssen, um ökonomisch, ökologisch und technisch voll konkurrenzfähig zu sein.

Die Einsatzmöglichkeiten dieser Technologie in der Industrie sind vielfältig. Bis 2030 wird der Endenergieverbrauch der österreichischen Industrie steigen. Somit wird auch eine effiziente und nachhaltige Prozesswärmebereitstellung eine Notwendigkeit. (Baumann, Eggler, Holzmann, Kalt, u. a., 2016)

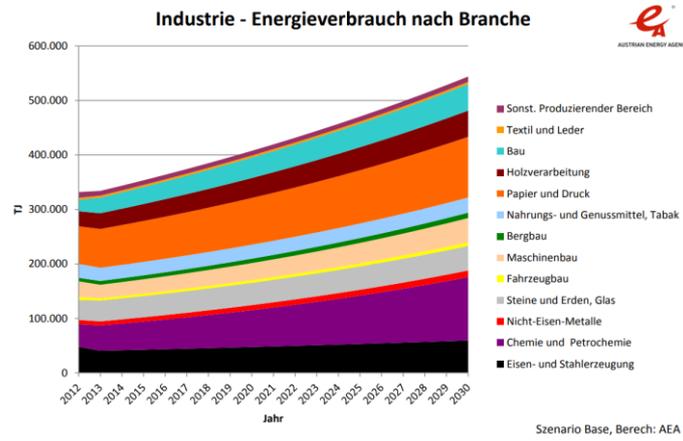


Abbildung 2: Endenergieverbrauch der österreichischen Industrie 2030 (Baumann, Egger, Holzmann, Kalt und Pauritsch, 2016)

2 Technische Grundlagen

2.1 Thermodynamische Grundlagen

Die Thermodynamik bildet die Grundlage der Wärmepumpentechnik. Sie lässt sich in die vier großen Erfahrungssätze unterteilen:

- Nullter Hauptsatz: Satz des thermischen Gleichgewichts
- Erster Hauptsatz: Energieerhaltungssatz
- Zweiter Hauptsatz: Satz der Grenzen von Energieumwandlung
- Dritter Hauptsatz: Satz der Nichterreichbarkeit des Absoluten Nullpunkts

Diese Sätze sind universell gültig und bilden ein wichtiges Gerüst der Physik und Chemie. (Jany und Thieleke, 2011)

2.1.1 Thermodynamische Systeme

Thermodynamik baut auf Beobachtungen auf. Gegenstände, oder Bereiche werden in der Thermodynamik als Systeme bezeichnet. Für eine genaue Beobachtung ist es notwendig ein thermodynamisches System von seiner Umgebung abzugrenzen.

Es gibt mehrere Systemarten. Wenn über definierte Systemgrenzen Energie- oder Stoffströme fließen, spricht man von offenen Systemen. Diese Art von System kommt in der Praxis sehr häufig vor.

Die zweite Systemart sind geschlossene Systeme. Diese haben keine Energie- oder Stoffströme, die die Systemgrenzen überqueren. Sie kommen in der Praxis selten vor, sind aber für theoretische Überlegungen sehr gut geeignet. (Jany und Thieleke, 2011)

Systeme können hinsichtlich ihrer Systemgrenzen wie folgt eingeteilt werden:

<u>Offene Systeme</u> (grenzt eine bestimmte Menge Raum ab)	<u>Geschlossene Systeme</u> (grenzt eine bestimmte Menge Stoff ab)
Offenes System (Allgemeiner Fall im thermodyn. System)	Geschlossenes System (keine Stoffübertragung)
Adiabatisch offenes System (keine Wärmeübertragung)	Adiabatisch geschlossenes System (keine Wärmeübertragung)
Rigides offenes System (keine Arbeitsübertragung)	Rigides geschlossenes System (keine Arbeitsübertragung)
	Abgeschlossenes System (keine Stoff- und Energieübertragung)

Tabelle 1: Arten thermodynamischer Systeme (Jany und Thieleke, 2011)

Tabelle 1 beschreibt offene und geschlossene Systeme, die sich durch Energie- und Stoffflüsse verändern können. Um diese Flüsse zu verstehen, ist es notwendig, thermische Zustandsgrößen zu definieren und zu unterscheiden. (Jany und Thieleke, 2011)

2.1.2 Zustandsgrößen und Prozessgrößen

Zustandsgrößen beschreiben den Zustand eines Systems. Diese Größen sagen jedoch nichts über Zustandsänderungen aus. Sie sind „wegunabhängig“.

Prozessgrößen sind Ursachen oder Folgen des im System laufenden Prozesses. Sie stellen Systemänderungen dar und werden daher als „wegabhängig“ bezeichnet. (Jany und Thieleke, 2011)

2.1.3 Intensive und Extensive Zustandsgrößen

Thermodynamische Systeme werden mit Zustandsgrößen beschrieben. Hierbei unterscheidet man intensive und extensive Zustandsgrößen.

Intensive Zustandsgrößen sind von der Stoffmenge n unabhängig. Das heißt, dass sich die intensiven Zustandsgrößen eines Systems nicht verändern, wenn eine gewisse Stoffmenge aus einem System entfernt wird. Intensive Zustandsgrößen sind Temperatur T und der Druck p .

Extensive Zustandsgrößen sind von der Stoffmenge n abhängig. Ändert sich die Stoffmenge, ändern sich auch extensive Zustandsgrößen. Diese sind Volumen V , Stoffmenge n und Masse m . (Kristen, 2015)

2.1.4 Thermische Zustandsgrößen

Thermische Zustandsgrößen werden benötigt, um einen Stoff in einem geschlossenen System zu beschreiben. Für eine genaue Beschreibung benötigt es Angaben zur Menge, Art und Zustand des zu beschreibenden Stoffes.

$$m = M * n \quad (1)$$

Wie in (1) beschrieben besteht zwischen der Masse m und der Stoffmenge über den Proportionalitätsfaktor M^1 ein Zusammenhang.

Die drei wichtigsten Größen, um den Zustand eines geschlossenen Systems zu beschreiben sind Druck p , Temperatur T und Volumen V .

2.1.4.1 Druck p

Der Druck p wird als absoluter Druck p_{abs} bezeichnet und gibt den Druck im Bezug zum leeren Raum an (Druck Null). Die SI - Einheit für Druck ist Pascal Pa mit der Einheit $[N/m^2]$. In der Technik wird häufig mit Bar bar gerechnet in der Einheit Meter Wassersäule $[m Ws]$. Auch Bar ist eine SI-Einheit, da $1 bar 10^5 Pa$ entspricht.

Der Druck lässt sich als Quotient von Kraft und Fläche beschreiben. Je mehr Kraft auf eine Fläche wirkt, desto größer ist der Druck. (LEIFIPhysik, 2015)

$$p = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Die Druckdifferenz Δp zwischen einem absoluten Druck p_{abs} und dem atmosphärischen Luftdruck der Erde p_{amb} heißt positiver Überdruck p_e^2 . In der Praxis wird häufig der Ausdruck Relativdruck benutzt p_{rel} .

¹ Molmasse M ist eine Stoffabhängige Konstante mit der Einheit $[g/mol]$ (Chemie.de, 2016a)

² Unterdruck wird nur noch beschreibend verwendet. Richtig ist negativer Überdruck. (Jany und Thieleke, 2011)

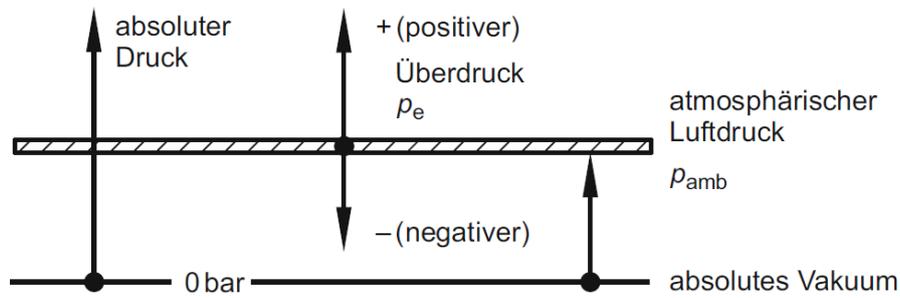


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Druckgrößen (Jany und Thieleke, 2011)

Abbildung 3 gibt eine Übersicht über den Zusammenhang verschiedener Druckgrößen. (Jany und Thieleke, 2011)

2.1.4.2 Temperatur T

Die absolute Temperatur, oder Kelvin-Temperatur, wird mit dem Formelzeichen T bezeichnet und hat als Nullpunkt den absoluten Nullpunkt³. Die SI-Einheit der absoluten Temperatur ist Kelvin [K].

$$T = \vartheta + T_0 \quad (3)$$

Die empirische Temperatur, oder Celcius-Temperatur wird mit dem Formelzeichen ϑ beschrieben. Der t_0 der Celcius-Temperatur wird mit dem Schmelzpunkt des Wassers (273,15 K) angegeben. Die Einheit der empirischen Temperatur ist Celsius [°C].

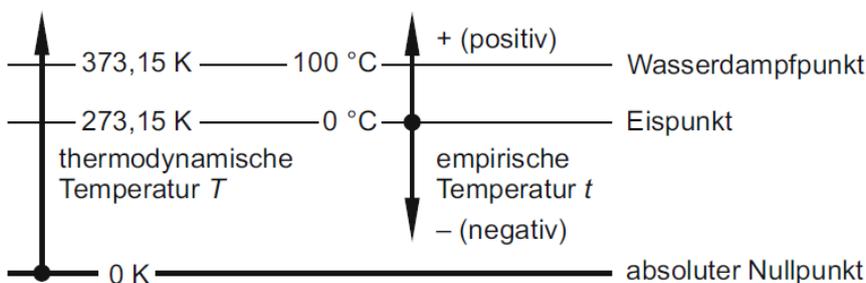


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Temperaturgrößen (Jany und Thieleke, 2011)

Die absolute Temperatur beschreibt die mittlere kinetische Energie pro Teilchen und Freiheitsgrad. Je höher also die Temperatur ist, desto höher ist die mittlere kinetische Energie der Teilchen.

³ Absoluter Nullpunkt (T_0) ist als 0 K (-273,15°C) bekannt. Hierbei sind keine Teilchenbewegungen mehr möglich. Diese Temperatur kann laut dem dritten Hauptsatz der Thermodynamik niemals erreicht werden, aber beliebig weit angenähert (Laserkühlung). (Chemie.de, 2012)

2.1.4.3 Volumen V

Das Volumen V ist das Maß für den Raumbedarf eines Gases. Die SI- Einheit des Volumens ist Kubikmeter $[m^3]$. Um den Raumbedarf eines Stoffes zu bestimmen, bezieht man das Volumen V entweder auf die Masse m wie in

(4) dargestellt, oder auf die Stoffmenge n , wie in (5) dargestellt.

$$v \equiv \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

$$V_m \equiv \frac{V}{n} \quad (5)$$

Bezieht sich das Volumen auf die Masse, so spricht man vom spezifischen Volumen v . Das stoffmengenbezogene Volumen heißt molares Volumen V_m . (Jany und Thieleke, 2011),(Baehr und Kabelac, 2012)

2.1.4.4 Zustandsdiagramme

In Zustandsdiagrammen lassen sich thermische Zustandsgleichungen graphisch darstellen. Dabei werden zwei Zustandsgrößen als kartesische Koordinaten benutzt und die dritte als Parameter. In der Thermodynamik ist es üblich, Parameterlinien anhand konstanter Verläufe von Zustandsgrößen zu zeichnen. In folgendem Diagramm werden die Zustandsgrößen p , T und v miteinander in Beziehung gesetzt:

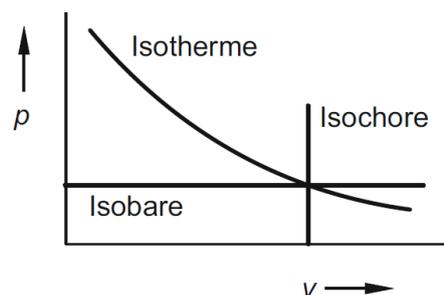


Abbildung 5: p,v -Diagramm mit Parameterlinien (Jany und Thieleke, 2011)

Die Linien werden als Isobare ($p = \text{konstant}$), Isotherme ($T = \text{konstant}$) und Isochore ($v = \text{konstant}$) bezeichnet.

2.1.5 Energie und Arbeit

Um Energieformen in geschlossenen Systemen zu untersuchen, wird der erste Hauptsatz der Thermodynamik herangezogen. Im Energieerhaltungssatz steht, dass sich die Gesamtenergie eines abgeschlossenen Systems nur über Energietransport über die Systemgrenzen ändern kann. Folglich kann Energie weder erzeugt noch vernichtet werden.

Da es sehr viele Formen von Energie gibt und keine allgemeine Definition, bedarf jede Energieform eine eigene Betrachtung (Jany und Thieleke, 2011),(Baehr und Kabelac, 2012).

2.1.5.1 Mechanische Energie

Die Mechanik unterscheidet zwischen kinetischer und potentieller Energie. Die kinetische Energie E_{kin} errechnet sich aus der Masse m und der Geschwindigkeit c . Die SI-Einheit der kinetischen Energie ist Joule [J]. (Bruno, 2007)

$$E_{kin} = m \frac{c^2}{2} \quad (6)$$

Die potentielle Energie E_{pot} errechnet sich (auf der Erde) über die Erdbeschleunigung g , die Masse m und die Höhe h . (Bruno, 2007)

$$E_{pot} = m * g * h \quad (7)$$

2.1.5.2 Innere Energie und Enthalpie

Innere Energie ist der Teil des Energiegehalts eines geschlossenen Systems, der als Arbeit oder Wärme über Systemgrenzen übertragen werden kann, oder als Streuenergie⁴ zugeführt wird (Jany und Thieleke, 2011).

Um die Energiebilanz E eines geschlossenen mechanischen Systems vollständig zu beschreiben, wird die kinetische Energie und die potentielle Energie um die innere Energie U erweitert. Die innere Energie hat die SI-Einheit Joule [J]. (Jany und Thieleke, 2011)

$$E = E_{kin} + E_{pot} + U \quad (8)$$

⁴ Streuenergie ist Arbeit, die durch Reibung oder anderen Entwertungsprozesse in andere Energieformen wie Innere Energie umgewandelt wird. (Jany und Thieleke, 2011)

Die Enthalpie H bezeichnet den Energiegehalt eines Stoffstroms und setzt sich aus innerer Energie und dem Produkt aus Druck und Volumen zusammen. (Oliver, 2007)

$$H = U + p * V \quad (9)$$

2.1.5.3 Wärme Q

Wärme ist eine Energieform, die auf thermischen Weg infolge eines Temperaturgradienten über eine Systemgrenze übertragen wird. Die SI-Einheit der Wärme Q ist Joule [J].

Die Wärme Q_{12} wird beim Prozess 1 \rightarrow 2 über die Systemgrenze eines geschlossenen Systems übertragen. Um die Wärme Q zu berechnen ist die Arbeit W_{12} (siehe 2.1.5.6) des Systems noch zu bestimmen.

$$Q_{12} = E_2 - E_1 - W_{12} \quad (10)$$

$$Q_{12} = m * \int_1^2 c_p(T) * dT = m * \bar{c}_p * \Delta T \quad (11)$$

Die Wärme Q_{12} errechnet sich aus der Masse m , dem Temperaturunterschied ΔT und der spezifischen Wärmekapazität⁵ c_p . (Jany und Thieleke, 2011)

2.1.5.4 Entropie S

Um die Entropie S zu definieren, sind die Aussagen des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik essenziell. Die Hauptaussagen des zweiten Hauptsatzes sind:

- Wärme kann nicht selbstständig von einem kälteren zu einem wärmeren Körper übergehen.
- Prozesse, bei denen Reibung auftritt, sind irreversibel.
- Prozesse, bei denen Stoffe vermischt werden, sind irreversibel.
- Technische Verbrennungsprozesse sind irreversibel.
- Die adiabatische Expansion eines Gases ohne Arbeitsleistung ist irreversibel.

Sämtliche realen Prozesse sind irreversible Prozesse. Das heißt, dass der Anfangszustand eines Systems nicht von selbst wieder herstellbar ist. Reversible Prozesse sind als optimale Prozesse Vergleichsmaßstäbe für Annäherungen.

⁵ Die spezifische Wärmekapazität c_p eines Stoffes ist eine physikalische Stoffeigenschaft. Sie gibt die Wärmekapazität eines Stoffes bezogen auf seine Masse an. Die Einheit ist $[\frac{J}{g \cdot K}]$. (Chemie.de, 2016b)

Die Entropie S ist ein Maß für irreversible Prozesse. Sie hat die Einheit $[\frac{J}{K}]$. Entropie ist eine Zustandsgröße, die über Wärme und Materialtransporte verändert werden kann. Sie kann jedoch niemals kleiner als 0 werden. Entropie wird durch irreversible Prozesse erzeugt.

Der Entropiestrom \dot{S}_Q setzt sich zusammen aus dem Wärmestrom \dot{Q} und der nicht negativen thermodynamischen Temperatur T an der Systemgrenze.

$$\dot{S}_Q = \frac{\dot{Q}}{T} \quad (12)$$

2.1.5.5 Anergie und Exergie

Um die Qualität der vorliegenden Energie beurteilen zu können benötigt es die Begriffe *Anergie* und *Exergie*. Exergie sind Energieformen, die sich unbeschränkt durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik in andere Energieformen transformieren lassen. Dazu zählen mechanische und elektrische Energieformen. Man spricht hier von entropiefreien Energien. Enthalpie, Wärme und innere Energie sind jedoch nur beschränkt in andere Energieformen umwandelbar. Auch diese Energien haben einen Exergieteil, jedoch haben sie auch einen Anteil, der nicht in Exergie umgewandelt werden kann. Dieser Teil heißt *Anergie*. (Baehr und Kabelac, 2012)

Die Exergie der Wärme ergibt sich aus der Wärmemenge Q und dem Carnotfaktor η_c .

$$E_x = Q * \eta_c \quad (13)$$

2.1.5.6 Arbeit W

In der Mechanik wird die Arbeit als Kraftkomponente F in Richtung des Weges ds beschrieben.

$$W = \int F ds \quad (14)$$

In der Thermodynamik spricht man häufig von Volumsänderungsarbeit W_v . Das Volumen eines Systems kann durch verrichtete Arbeit (ausgeübte Kraft) am geschlossenen System geändert werden. Die Volumsänderungsarbeit kann wie folgt definiert werden:

$$W_V = - \int_{V_1}^{V_2} p \, dV = -p * (V_2 - V_1) \quad (15)$$

Die technische Arbeit wird spezifisch dargestellt. Wenn sich in einem Kreislaufprozess etwa isochor der Druck verändert wird technische Arbeit benötigt, die wie folgt definiert ist: (Baehr und Kabelac, 2012)

$$w_t = \int_{p_1}^{p_2} v \, dp = v * (p_2 - p_1) \quad (16)$$

2.1.5.7 Leistung P

Leistung ist definiert, als verrichtete Arbeit W in einer gewissen Zeitspanne Δt . Die Einheit der Leistung P ist $\left[\frac{J}{s}\right] = [W]$. (Baehr und Kabelac, 2012)

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (17)$$

2.1.6 Normen und Kennzahlen

Um Hochtemperaturwärmepumpen (HTWP) technisch, ökonomisch und ökologisch beschreiben und miteinander vergleichen zu können bedarf es Normen und Kennzahlen.

2.1.6.1 Normen

Für Prüfbedingungen und Prüfabläufe, sowie die genauen Messverfahren für Wärmepumpenprüfungen wird die EN 14511:2013 herangezogen. In 5.2.2 wird auf diese Norm Bezug genommen, da die Wärmepumpenprüfung auf diese aufbaut.

2.1.6.2 Carnot Faktor

Der Begründer der Thermodynamik, der Physiker Nicolas Carnot entdeckte, dass der thermische Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine nur von der mittleren Temperatur der Wärmeaufnahme T_{zu} und der mittleren Temperatur der Wärmeabgabe T_{ab} abhängt. Dieser Faktor wird als Carnot Faktor η_c bezeichnet und wird für Wärmepumpenprozesse wie folgt gebildet (Jany und Thieleke, 2011), (Baehr und Kabelac, 2012).

$$\eta_C = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}} \quad (18)$$

Den Kehrwert des Carnoffaktors nennt man Leistungszahl nach Carnot ε_C :

$$\varepsilon_C = \frac{1}{\eta_C} = \frac{T_{ab}}{T_{ab} - T_{zu}} \quad (19)$$

Dieser Faktor gilt für linkslaufende Prozesse, wie der einer Wärmepumpe. Anders als bei einer Wärmekraftmaschine wird Arbeitsleistung verbraucht, um Wärme entgegen dem Temperaturgefälle zu transportieren, um zu kühlen (Jany und Thieleke, 2011).

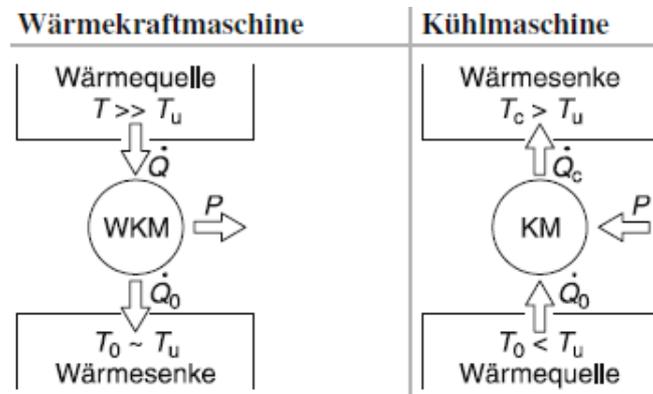


Abbildung 6: Schema rechts- und linkslaufender thermodynamischer Prozesse (Jany und Thieleke, 2011)

2.1.6.3 Leistungszahl

Die Leistungszahl, im englischen COP (Coefficient of Performance) ist die wesentlichste Effizienzkennzahl einer Wärmepumpe. Sie stellt das Verhältnis der abgegebenen Heizleistung Q_{ab} zur aufgewendeten Antriebsleistung des Verdichters P_{el} dar. (Cordin Arpagaus, 2019)

$$COP_{WP} = \frac{|Q_{ab}|}{P_{el}} \quad (20)$$

Die Hochtemperaturwärmepumpe Ochsner IWWDS ER3c4 erreicht in der Praxis mit einer Senktemperatur 90°C und einem Temperaturhub von 25 K einen COP von 5,8-6,0. Das ist der aktuelle Spitzenwert einer Hochtemperaturwärmepumpe am Markt.

Der COP stellt eine Momentaufnahme dar. Er kann sich unter gewissen Voraussetzungen und Gegebenheiten ändern.

2.1.6.4 Exergetischer Wirkungsgrad

Der exergetische Wirkungsgrad ζ (auch Gütegrad) gibt an, wie viel der aufgewendeten Exergie tatsächlich genutzt wird. Ein $\zeta = 1$ bedeutet, dass die reale Wärmepumpe der idealen Wärmepumpe entspricht. (Lambers, Süß und Köhler, 2007)

$$\zeta = \frac{COP}{\varepsilon_C} \quad (21)$$

2.1.6.5 Jahresarbeitszahl

Die Jahresarbeitszahl β errechnet sich über die über ein gesamtes Jahr gelieferte Nutzenergie und die über ein gesamtes Jahr benötigte elektrische Energie für den Verdichter.

$$\beta = \frac{\int Q_{ab} dt}{\int P_{el} dt} = \frac{Q_{ab}}{W_{el}} \quad (22)$$

Besonders bei Quelltemperaturen, die sich über den Jahresverlauf ändern, ist die Betrachtung der Jahresarbeitszahl sinnvoll. (Verein deutscher Ingenieure e. V., 2019)

2.1.6.6 Wirkleistungsfaktor

Der Cosinus des Phasenverschiebungswinkel φ gibt das Verhältnis von Wirkleistung P zu Scheinleistung S an.

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad (23)$$

Dieser sagt aus, wie viel der elektrischen Leistung in Wirkleistung umgesetzt wird. (Bastian, Bumiller, Burgmaier, Eichler, u. a., 2002)

2.2 Wärmepumpen

Wärmepumpen in ihrer heutigen Form haben einen langen Weg hinter sich. Zuerst als Nebeneffekt der Kälteproduktion wahrgenommen, wurde ihr Potential erst spät entdeckt.

2.2.1 Funktionsweise von Wärmepumpen

2.2.1.1 Einfache Wärmepumpen

Wärmepumpen liegen, anders als Clausius-Rankine oder Joule-Brayton Prozesse, einem linkslaufenden Kreisprozess zugrunde. Hier kehren sich die Vorzeichen von Wärme und Arbeit um, da Arbeit zu- und Wärme abgeführt wird. Wärmepumpen sind somit Maschinen, die Niedertemperaturwärme durch Einsatz von Arbeit effizient auf ein nutzbares Temperaturniveau heben können. Der ideale Kreisprozess einer Wärmepumpe wird wie folgt in Abbildung 7 dargestellt:

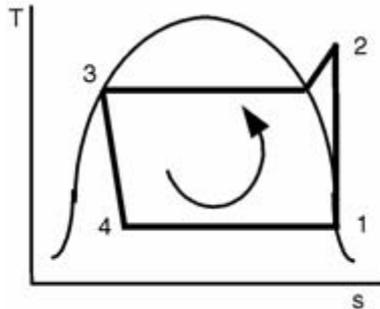


Abbildung 7: Ideales T,s - Diagramm des Wärmepumpenprozesses (Zahoransky, 2007)

Dieser Prozess ist, wie zuvor erläutert ein linkslaufender. Von 1 → 2 wird der Arbeitsmitteldampf im idealisierten Prozess isentrop⁶ verdichtet. Anschließend wird er im Kondensator bei hoher Temperatur von 2 → 3 isobar⁷ verflüssigt. Dabei wird Kondensationswärme in Form von nutzbarer Wärme abgegeben. Es folgt das Expansionsventil, in dem von 3 → 4 eine isenthalpe⁸ Expansion unter Entropiezunahme erfolgt. Das nun entspannte Zweiphasenfluid verdampft nun bei niedriger Temperatur von 4 → 1 und entzieht der Niedertemperaturwärmequelle Verdampfungswärme. (Zahoransky, 2007)

⁶ Isentrop bedeutet, dass trotz der Zustandsänderung die Entropie konstant bleibt ($\Delta S = 0$)

⁷ Isobar bedeutet, dass trotz der Zustandsänderung der Druck konstant bleibt ($\Delta p = 0$)

⁸ Isenthalp bedeutet, dass trotz Zustandsänderung die Enthalpie konstant bleibt ($\Delta H = 0$)

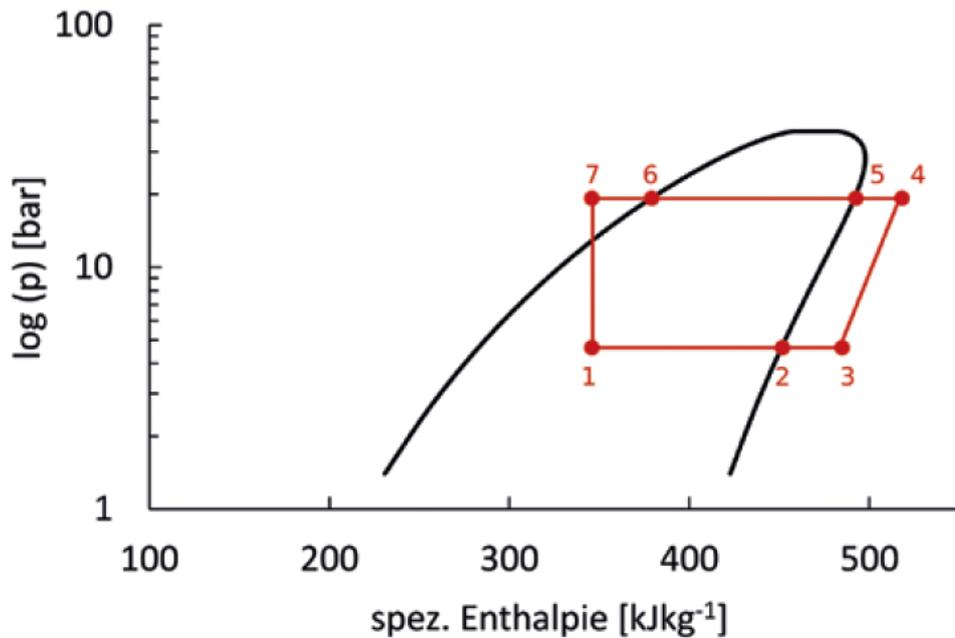


Abbildung 10: Darstellung einer rekuperativen Sauggasüberhitzung (Pröll und Wolf, 2019)

Im Log(p)-h-Diagramm der Abbildung 10 wird eine rekuperative Sauggasüberhitzung beschrieben. Von 1 – 2 wird isobar verdampft. Nun wird von 2 – 3 mit dem inneren Wärmeübertrager überhitzt. Von 3 – 4 wird im Verdichter das überhitzte Sauggas verdichtet. Nach der Verdichtung wird das Gas von 4 – 5 isobar entkühlt und weiter von 5 – 6 isobar kondensiert. Anschließend findet im inneren Wärmeübertrager von 6 – 7 eine isobare Unterkühlung statt. Schlussendlich findet in der Drossel eine isenthalpe Drosselung von 7 – 1 statt und der Prozess beginnt von vorne. (Pröll und Wolf, 2019)

2.2.2 Typisierung von Wärmepumpen

Laut Eder kann man Wärmepumpen in verschiedene Arten einteilen. Wärme lässt sich durch eine Vielzahl von thermodynamischen Verfahren von einem niedrigeren auf ein höheres Niveau bringen. Abbildung 11 zeigt eine systematische Einteilung der Wärmepumpen. (Eder und Moser, 1979)

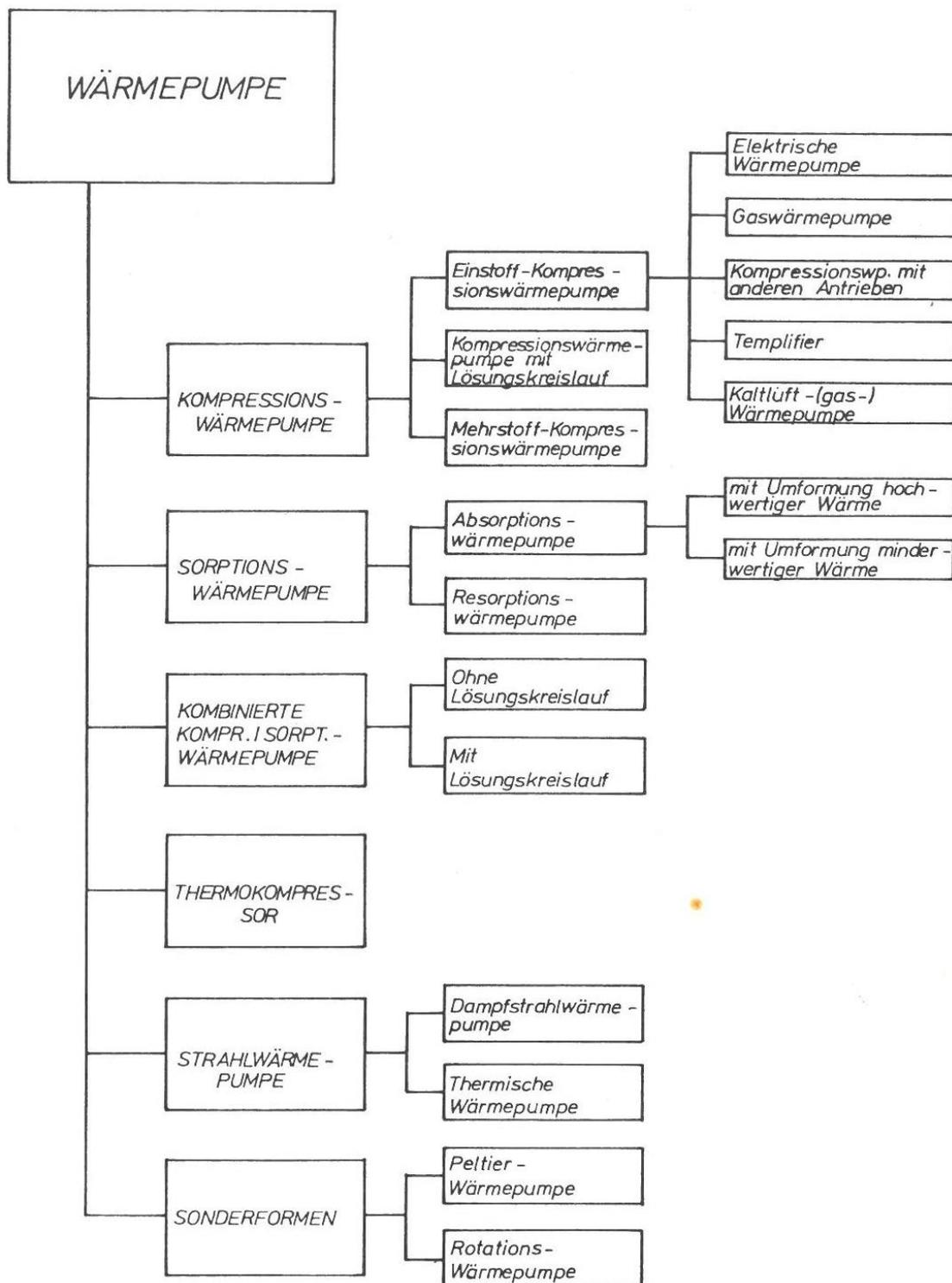


Abbildung 11: Systematik der Wärmepumpen (Eder und Moser, 1979)

2.2.2.1 Kompressionswärmepumpen

Kompressionswärmepumpen sind der häufigste Wärmepumpentyp. Diese Wärmepumpenart enthält einen mechanisch angetriebenen Kompressor. Der Kompressor kann unterschiedlich angetrieben werden, was die Flexibilität dieses Wärmepumpentyps hervorhebt. Am häufigsten wird ein Elektromotor eingesetzt, jedoch sind auch Verbrennungsmotoren (Erdgas, Biogas,

Dieselmotoren und Gasturbinen in der Lage den Kompressor anzutreiben. Vorteilhaft ist hier, dass die Abwärme der Verbrennungskraftmaschinen direkt von der Wärmepumpe genutzt werden kann und somit der Systemwirkungsgrad erhöht werden kann. (Paschotta, 2018b)

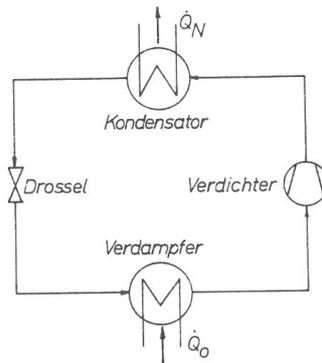


Abbildung 12: Schema einer einstufigen Kompressionswärmepumpe (Eder und Moser, 1979)

Abbildung 12 zeigt das Schema einer einstufigen Kompressionswärmepumpe. Um hohe Druckverhältnisse im Verdichter zu vermeiden, kommen in der Praxis Wärmepumpen in mehrstufiger Ausführung (Abbildung 13) oder in Kaskadenschaltung vor. Besonders bei hohem Temperaturhub (Hochtemperaturwärmepumpen) empfehlen sich diese Ausführungen. (Eder und Moser, 1979)

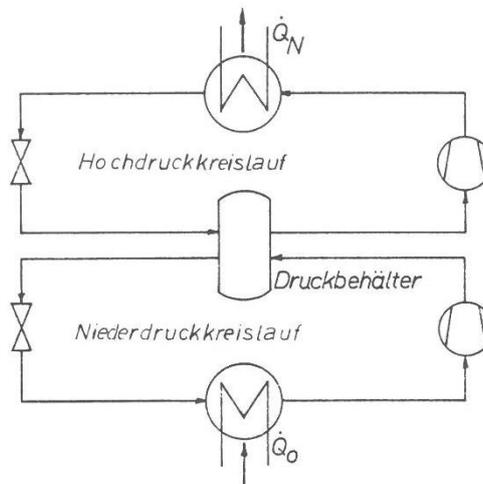


Abbildung 13: Schema einer Zweistufigen Kompressionswärmepumpe (Eder und Moser, 1979)

2.2.2.2 Sorptionswärmepumpen

Sorptionswärmepumpen haben anders als Kompressionswärmepumpen, einen „thermischen“ Verdichter anstatt eines Mechanischen. Sorptionswärmepumpen funktionieren aber nach dem gleichen Kreisprozess wie Kompressionswärmepumpen. Dabei unterscheidet man grundlegend zwischen Absorptionswärmepumpen und Adsorptionswärmepumpen. (Eder und Moser, 1979)

Absorptionswärmepumpen (Abbildung 14) haben einen Kreislauf, der folgende 4 Phasen durchläuft: Als erstes gelangt das flüssige Kältemittel in den Verdampfer. Dort wird von der Umwelt Wärme aufgenommen und das Kältemittel verdampft. Im 2. Schritt wird der Dampf des Kältemittels im Absorber von einer Flüssigkeit aufgenommen (absorbiert), wobei es dafür sorgt, dass der Druck im System niedrig bleibt. In der 3. Phase gelangt das nun gesättigte Sorptionsmittel zu einem Wärmeübertrager. Hier liegt die Besonderheit von Sorptionswärmepumpen. Eine Wärmequelle erhitzt die Flüssigkeit und trennt das Kältemittel von der Flüssigkeit. Die Wärmequelle kann dabei flexibel sein. Es ist möglich diese Wärme durch Feuerungen mit Erdgas, Flüssiggas, Biogas oder Heizöl bereitzustellen, aber es ist auch möglich industrielle Abwärme oder Solarthermie als Wärmequelle zu nutzen. (Paschotta, 2017),(Rosenkranz, 2019)

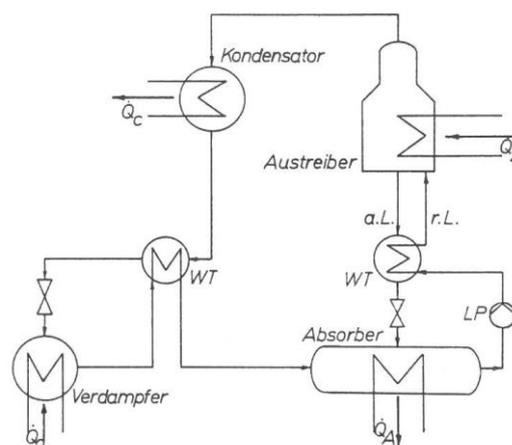


Abbildung 14: Absorptionswärmepumpe mit inneren Wärmetauscher (Eder und Moser, 1979)

Adsorptionswärmepumpen (Abbildung 15) sind Wärmepumpen, bei denen das Kältemittel durch Anlagerung (Adsorption) an ein festes Adsorbiermaterial aus dem Verdampfer getrieben wird. Die Besonderheit der Adsorptionswärmepumpe besteht in ihrem (orts-)festen Adsorbiermaterial Zeolith⁹, einem porösen Gestein. Wie bei allen Wärmepumpen liegt im Verdampfereingang das Kältemittel (in diesem Fall Wasser) flüssig und unter niedrigem Druck vor. Das Kältemittel nimmt nun im Verdampfer von der Umwelt Wärmeenergie auf und verdampft. Das verdampfte Kältemittel wird vom Zeolith aufgenommen, wodurch sich dieser erwärmt. Über einen Wärmetauscher wird dem Sorptionsmittel Nutzwärme entzogen. Dieser Vorgang funktioniert solange, bis das Sorptionsmaterial gesättigt ist und kein weiteres Kältemittel mehr aufnehmen kann. Es folgt die sogenannte *Desorptionsphase*. Hierbei wird das adsorbierte Kältemittel durch starkes Erhitzen aus dem Zeolith ausgetrieben. Die Wärmezufuhr erfolgt hierbei durch ein heißes Fluid, wodurch sich die Art der Wärmequelle flexibel gestalten lässt und, ähnlich wie bei *Adsorptionswärmepumpen* durch verschiedene Brenntypen, Abwärme oder

⁹ Zeolithe sind Tektosilikate (Gerüstsilikate) mit großräumigen Kanälen und Käfigen, die für Wasser zugänglich sind (Röhr, 2016)

Solarthermie betrieben werden kann. Das verdampfte Kältemittel gelangt nun wieder in den Teil, der zuvor als Verdampfer diente und kondensiert dort. Die dabei freiwerdende Wärme wird wiederum über einen Wärmeübertrager abgeführt und der Prozess kann wieder von vorne beginnen. Der Vorteil dieses Anlagentyps besteht aus dem geringen Wartungsaufwand durch wenige bewegliche Teile. Der Nachteil ist jedoch, dass keine kontinuierliche Wärmeabgabe mit nur einem Adsorptionselement möglich ist. Um dieses Problem zu schmälern können 2 Module phasenverschoben zueinander betrieben werden. (Paschotta, 2018a)

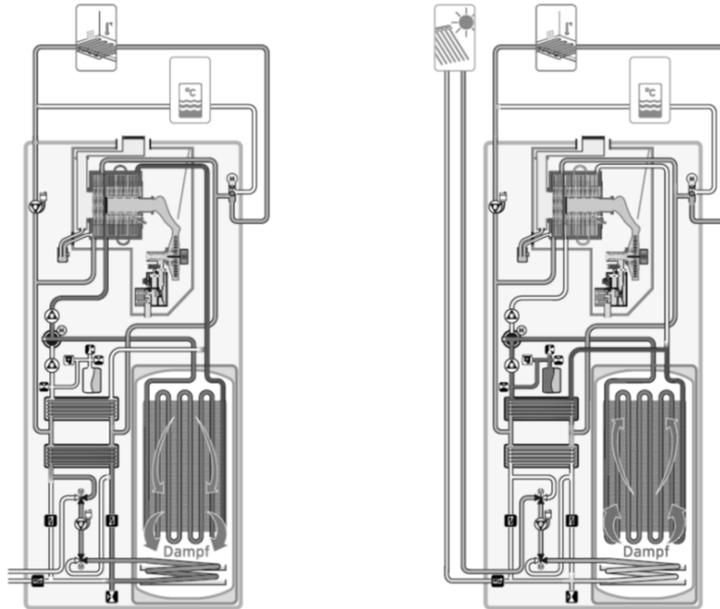


Abbildung 15: Desorptions- und Adsorptionsphase einer Adsorptionswärmepumpe (Loeti, 2012)

2.2.2.3 Thermokompressoren

Anders als Kompressions- oder Sorptionswärmepumpen sind thermische Kompressoren (Abbildung 16) offene Systeme mit mechanischen Kompressorantrieb, die zur Brüdenkompression¹⁰ eingesetzt werden. Die Brüden dienen als Wärmequelle und werden vom Kompressor angesaugt und verdichtet. Die dabei entstehende Kondensationswärme wird wieder an den Prozess abgegeben. Die Verdichtung erfolgt nur soweit, bis die Brüden als Heizdampf wiederverwendet werden kann. (Eder und Moser, 1979)

¹⁰ Brüden ist eine Bezeichnung für entspannten Dampf (Techniklexikon, 2019)

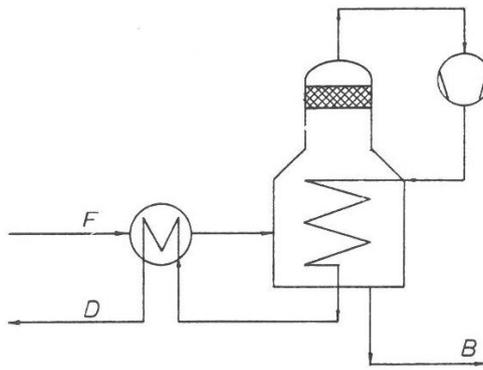


Abbildung 16: Verdampfer mit Thermokompressor (Eder und Moser, 1979)

2.2.2.4 Strahlwärmepumpen

Strahlwärmepumpen heben mit Hilfe eines Treibmediums Abdampf auf ein höheres Temperaturniveau. Hierbei unterscheidet man Dampfstrahlwärmepumpen, die als Treibmedium Satt-dampf verwenden und thermische Wärmepumpen, die als Treibmedium hochgespanntes Heißwasser verwenden. (Eder und Moser, 1979)

Dampfstrahlwärmepumpen (Abbildung 17) fördern niedriggespannten Dampf durch Verdichten mittels höher gespannten Dampfs auf ein mittleres Temperaturniveau. Anders als beim Thermokompressor wird der Dampf mittels eines Dampfstrahlverdichters verdichtet. Da die Dampfstrahlwärmepumpe ein offener Prozess ist wird über die Wärmequelle sowohl Anergie wie auch Exergie aufgenommen.

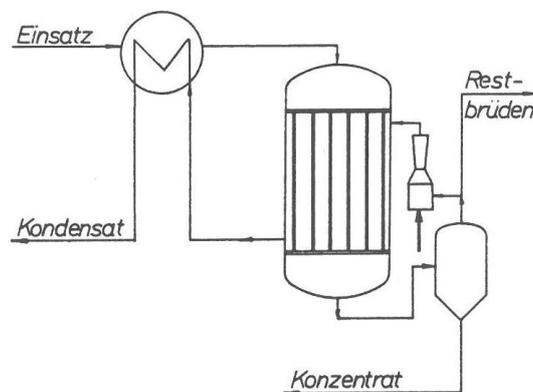


Abbildung 17: Dampfstrahlverdichter in einem Verdampfungs- und Destillationsprozess (Eder und Moser, 1979)

Thermische Wärmepumpen (Abbildung 18) verwenden anders als Dampfstrahlverdichter siedendes Wasser. Die Thermische Wärmepumpe hat im Verdichter jedoch weniger Verluste, weshalb sie effizienter arbeitet als Dampfstrahlverdichter. Da der Austritt der thermischen Wärmepumpe im Nassdampfgebiet liegt, muss ein Abscheider nachgeschaltet werden, um Satt-dampf und siedende Flüssigkeit zu trennen. (Eder und Moser, 1979)

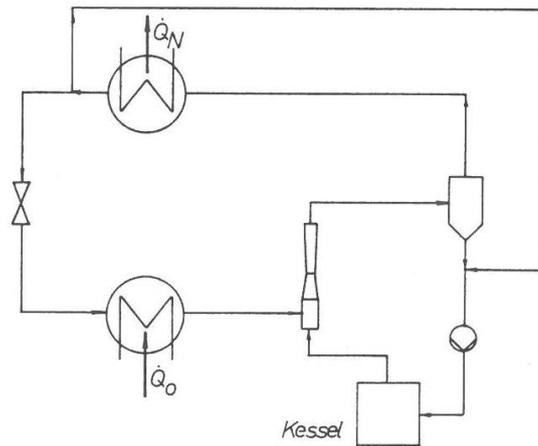


Abbildung 18: Thermische Wärmepumpe (Eder und Moser, 1979)

2.2.2.5 Sonderformen der Wärmepumpe

Sonderformen sind spezielle Wärmepumpen, die entweder nur Anwendungen für spezielle Aufgabenbereiche finden, oder nur aufgrund ihres zugrundeliegenden physikalischen Effekts zu den Wärmepumpen zählen, jedoch keine herausragenden Vorteile aufweisen.

Peltierwärmepumpen (Abbildung 19) nutzen den Peltiereffekt aus. Durch einen äußeren Stromfluss wird eine Änderung des Wärmetransportes bewirkt. Der Peltier-Effekt tritt dann auf, wenn 2 Leiter mit unterschiedlichen Wärmekapazitäten in Kontakt gebracht werden. Zusätzlich müssen durch einen von außen zugeführten elektrischen Strom Elektronen von dem einen Leiter in den anderen fließen. Hierfür gibt es 2 Fälle:

- Wenn ein Strom aus dem Leiter mit höherenergetischen Elektronen in den Leiter mit niederenergetischen Elektronen fließt, so geben die höherenergetischen Elektronen durch Stöße Energie an niederenergetischere Elektronen ab. Die niederenergetischen Elektronen gewinnen an Energie, was zu einer Erhöhung der Temperatur des Leiters führt.
- Wenn ein Strom aus dem Leiter mit niederenergetischen Elektronen in den Leiter mit höherenergetischen Elektronen fließt, geben höherenergetische Elektronen durch Stöße Energie an niederenergetischere Elektronen ab. Die höherenergetischen Elektronen verlieren an Energie, was zu einer Verringerung der Temperatur des Leiters führt. (Chemie.de, 2013)

Der Vorteil der Peltierwärmepumpe liegt darin, dass sie keine beweglichen Teile hat, sondern quasi nur ein Halbleiterelement ist. Das macht ein leichtes Verbauen und einen wartungsfreien Betrieb möglich. Eingesetzt werden Peltierwärmepumpen bei der elektrischen Bauteilkühlung. (Eder und Moser, 1979)

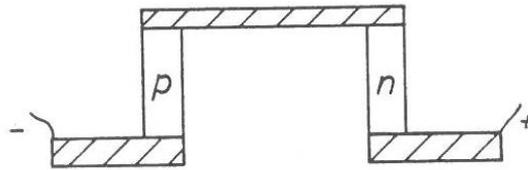


Abbildung 19: Peltierelement einer Peltierwärmepumpe (Eder und Moser, 1979)

Rotationswärmepumpen nutzen eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit des Wärmeübertragungsmediums aus, um den Wärmeübergang von Wärmeübertragungsflächen zu erhöhen. Im Prinzip besteht dieser Wärmepumpentyp nur aus einer doppelwandigen Trommel mit einem zentralen Rohr und einem Gebläse. Der Kältemitteldampf wird vom Gebläse angesaugt und verdichtet in den zentralen Kanal geleitet. Von dort gelangt er in die rotierende Trommel, wo er kondensiert. Nach dem Kondensator strömt das Kältemittel entlang des Zylindermantels wieder zum Verdampfer. Der Dampf wird wieder vom Gebläse angesaugt. Das österreichische Unternehmen ecop hat mit der *Rotation Heat Pump K7* eine Rotationswärmepumpe für industrielle Anwendungen geschaffen. Mit 700 kW thermischer Leistung und einem Temperaturbereich von -20°C bis 150°C erreicht sie einen COP zwischen 4 und 7 und ist somit für eine Vielzahl von Anwendungen geeignet. (Eder und Moser, 1979),(ecop, 2020).

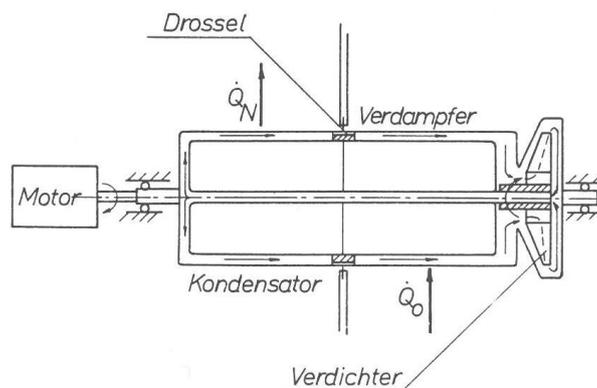


Abbildung 20: Rotationswärmepumpe (Eder und Moser, 1979)

2.2.2.6 Hochtemperatur-Wärmepumpen

Eine Hochtemperaturwärmepumpe ist eine Wärmepumpe mit der Besonderheit, dass dieser Wärmepumpentyp hohe Senkentemperaturen liefern kann. Je nach Literatur fängt diese Senkentemperatur bei 80°C an (Rosenkranz, 2018) und kann bis etwa 150°C (Schaefer, 1994) realisiert werden. Herausfordernd ist dabei der große Temperaturhub zwischen Verdampfungstemperatur und Kondensationstemperatur. In einstufigen Hochtemperaturwärmepumpen kommt es zu hohen Druckverhältnissen, weshalb die Anlage speziell für hohe Drücke ausge-

legt sein muss. Auch an das Arbeitsmittel (2.3 Kältemittel) werden durch verschiedene Anwendungsbereiche unterschiedliche Anforderungen gestellt. Zweistufige Hochtemperaturwärmepumpen lassen sich wie im Beispiel Abbildung 21 realisieren. Der erste Kreis kann bereits ab -20°C über den Verdampfer Wärme aufnehmen und gibt diese bei 35°C ab. Der zweite Kreis nimmt über den Verdampfer Wärme bei 30°C auf und gibt diese bei 110°C am Kondensator ab. Dadurch lassen sich beide Kreise hinsichtlich ihres Einsatzgebietes optimieren. Der erste Kreis ist für Wärmeaufnahme bei niedrigen Temperaturen optimiert, während der zweite Kreis für einen Temperaturhub jenseits von 100°C ausgelegt ist. (Schaefer, 1994)

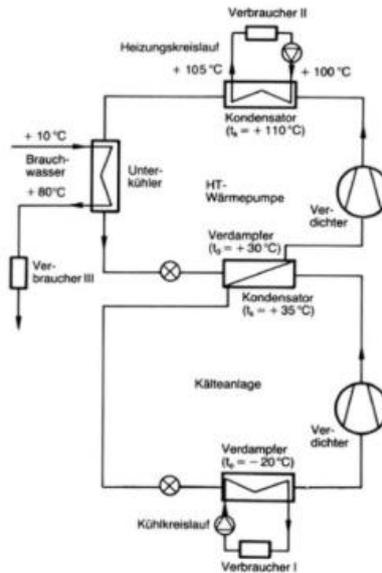


Abbildung 21: Zweistufige Hochtemperaturwärmepumpe (Schaefer, 1994)

2.3 Kältemittel

Kältemittel sind Arbeitsmedien für Kältemaschinen. Es gibt am Markt eine große Auswahl an Kältemitteln und nicht jedes Kältemittel ist für jede Anwendung geeignet. Grundsätzlich sind folgende technische Anforderungen an das Medium gestellt:

- Hohe Verdampfungsenthalpie
- Große volumetrische Heizleistung
- Hohe Wärmeübergangszahlen in Kondensator und Verdampfer
- Niedrige Verdichtungsendtemperatur
- Drücke, die saugseitig über Atmosphärendruck, druckseitig jedoch so niedrig wie möglich sind.
- Gute chemische Stabilität und gute Löslichkeit mit Schmierölen
- Günstige chemische und toxische Eigenschaften

In der Praxis können alle Eigenschaften nicht optimal erreicht werden, weshalb Kältemittel für spezielle Prozesse optimiert werden. (Eder und Moser, 1979)

Bis zu den 1970er-Jahren wurden immer neue und bessere Kältemittel kreiert. Fokus lag auf Sicherheit, weshalb auch Eigenschaften wie Brennbarkeit, Explosionsgefahr und Toxizität eine Wichtige Rolle spielten. Als Molina und Rowland 1974 die Hypothese aufstellten, dass FCKWs¹¹ maßgeblich am Abbau von atmosphärischem Ozon beitragen, wurde unter großen gesellschaftlichen wie politischen Druck an klimafreundlicheren Arbeitsmedien gearbeitet. (Lotz, 2015)

Die Substituten für FCKWs waren sogenannte HFKWs, teilfluorierte Kohlenwasserstoffe, die zwar in ihren Eigenschaften den FCKWs sehr ähnlich sind, jedoch die Ozonschicht nicht derart belasten. Heute werden diese Stoffe als Zwischenlösung eingestuft, da sie ein beträchtliches GWP (Global Warming Potential) besitzen. Die Anforderungen für zukünftige Kältemittel sind also günstige chemische Eigenschaften, sicheres Handhaben und klimaschonend. (Braune, Läufe, Duran und Graaf, 2018)

Unterschiedliche Kältemittel haben unterschiedliche Einsatzgebiete (Temperaturniveaus), in denen sie arbeiten können. In folgender Grafik werden die Temperaturbereiche von den wichtigsten Kältemitteln der Hochtemperaturwärmepumpen aufgezeigt:

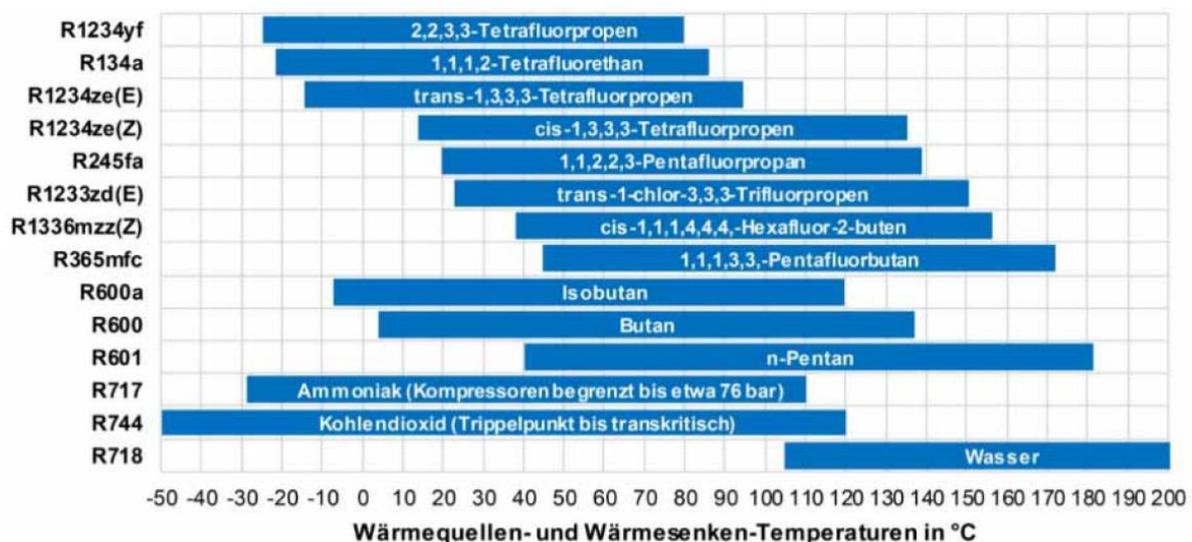


Abbildung 22: Einsatzbereich von verschiedenen Kältemitteln für HTWP-Anwendungen (Cordingeneric Arpagaus, 2019)

2.3.1 R245fa

In der Hochtemperatur-Wärmepumpe des Prüfstands befindet sich das Kältemittel R245fa. In Tabelle 2 sind die Eckdaten dieses Kältemittels zusammengefasst:

¹¹ FCKW steht für Fluorchlorkohlenwasserstoff. FCKWs sind Kohlenwasserstoffe, bei denen Wasserstoffatome durch Halogene Fluor oder Chlor ersetzt wurden. Diese Stoffe waren Mitte des 20. Jahrhunderts maßgeblich am Abbau des atmosphärischen Ozons beteiligt. (Bayer und Walter, 1991)

Firmenneutrales Kurzzeichen	R245fa
Chemischer Name	1,1,1,3,3-Pentafluoropropane
Molekulare Formel	CF ₃ CH ₂ CHF ₂
Molekulares Gewicht	134,03 g/mol
Schmelzpunkt	-103°C
Siedepunkt	15,3°C
Flammpunkt	412°C
Dampfdruck bei 20°C	1227 hPa
Dichte bei 20°C	1,32 g/cm ³
pH-Wert	~7
Färbung	farblos
Wärmekapazität	1,36 kJ/KgK
Kritische Temperatur	154,01°C
Kritischer Druck	36,51 bar
Treibhausgaspotential (GWP) 100 Jahre	1030

Tabelle 2: Eigenschaften Kältemittel R245fa (Genetron, 2019)(climalife, 2014)

R245fa hat keine schädigende Wirkung auf die Ozonschicht, jedoch mit 1030 ein sehr hohes GWP¹². Eine besondere Eigenschaft dieses Kältemittels ist sein überhängendes Zweiphasengebiet (Abbildung 23). Um eine Kondensatbildung während der Kompression zu verhindern, muss eine ausreichende Überhitzung am Verdichtereintritt sichergestellt werden. (Pröll und Wolf, 2019)

¹² GWP bezieht sich auf das Erwärmungspotential von CO₂. 1 kg R245fa hat somit das gleiche Erwärmungspotential wie 1030 kg CO₂. (Cold.world, 2018)

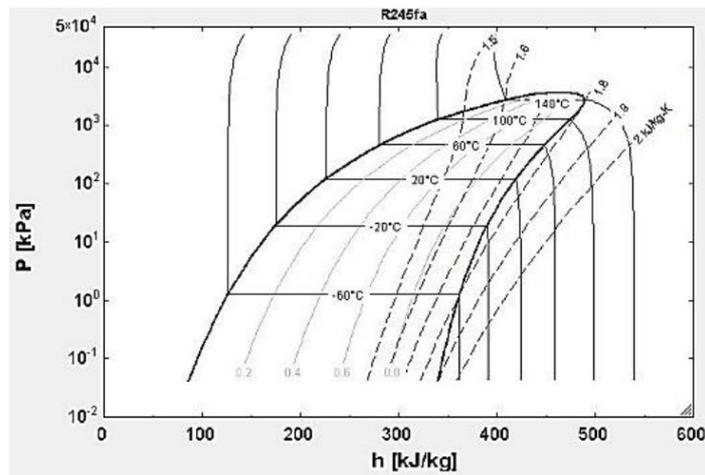


Abbildung 23: p-h-Diagramm für R245fa (Arpagaus, 2017)

2.3.2 R365mfc

Zuvor war die Versuchswärmepumpe mit dem Kältemittel R365mfc befüllt. Da es eine der Forschungsfragen ist, die Unterschiede im Betrieb beider Kältemittel festzustellen, ist es notwendig auf die Eigenschaften von R365mfc einzugehen:

Firmenneutrales Kurzzeichen	R365mfc
Chemischer Name	1,1,1,3,3-Pentafluorobutane
Molekulare Formel	$\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CF}_2\text{CH}_3$
Molekulares Gewicht	148,07 g/mol
Siedepunkt	40,15°C
Kritische Temperatur	186,85°C
Kritischer Druck	31,65 bar
Treibhausgaspotential (GWP) 100 Jahre	794

Tabelle 3: Eigenschaften Kältemittel R365mfc (eThermo, 2021)

Auch R365mfc besitzt wie R245fa ein überhängendes Zweiphasengebiet, was eine ausreichend hohe Überhitzung notwendig macht. Das GWP ist niedriger als bei R245fa, jedoch immer noch zu hoch, um großflächig eingesetzt werden zu können. Zusätzlich ist dieses Kältemittel brennbar, weshalb an Alternativen (3.4.2) geforscht wird. (Arpagaus, 2017)

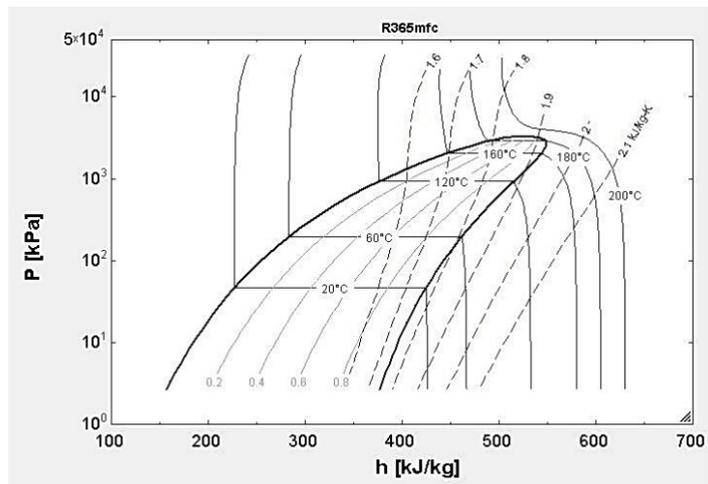


Abbildung 24: p-h-Diagramm für R365mfc (Arpagaus, 2017)

3 Stand der Technik und Potential

3.1 Stand der Forschung

Forschung um Hochtemperaturwärmepumpen hat mit der Volatilität des Ölpreises stark zugenommen. Die Forschungstätigkeit weltweit ist hoch, jedoch konzentriert sich ein Großteil der Anstrengungen auf ein paar Länder: Österreich, Frankreich, Deutschland, Japan, Norwegen, Schweiz, Korea, China und die Niederlande.

Derzeit finden folgende Kältemittel in der Forschung Verwendung: R1336mzz, R718, R245fa, R1233zd, R1234ze, R600, R601, sowie Flüssigkeiten, die nicht genauer spezifiziert werden (Kältemittel ohne veröffentlichte Informationen). Im Bereich der Kältemittel bewegt sich die Forschung sehr schnell. Ziel sind Senktemperaturen von 160°C und der Einsatz von möglichst natürlichen Flüssigkeiten, wie etwa Kohlenwasserstoffe, Kohlendioxid oder Wasser.

Auch beim COP ist einiges passiert. Die Effizienz der Anlagen konnte bei höheren Temperaturhub verbessert werden (Abbildung 25). (Cordin Arpagaus, 2019)

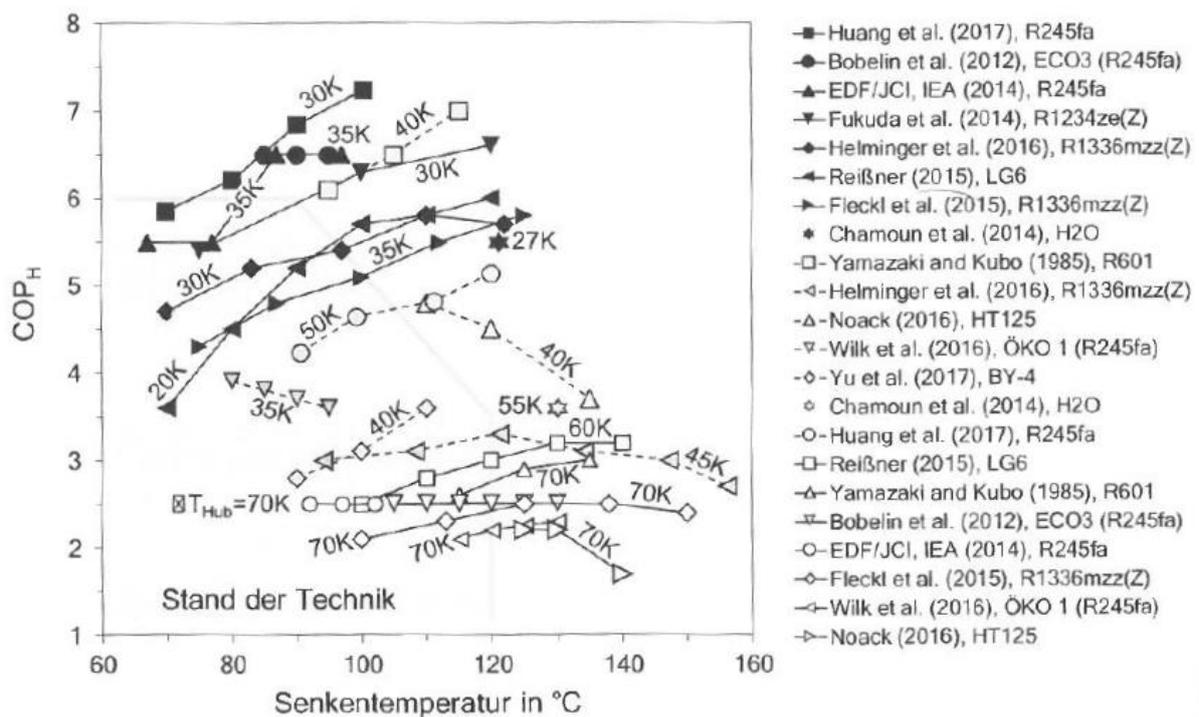


Abbildung 25: COPs führender Forschungsanlagen (Cordin Arpagaus, 2019)

Die COPs steigen mit höheren Senktemperaturen und niedrigeren Temperaturhub. Mit Stand 2019 liegen die Bandbreiten der COPs von Forschungsanlagen in folgenden Bereichen: Für eine Senktemperatur von 120°C bei einem Hub von 30 K liegt der COP führender Forschungsanlagen zwischen 5,7 und 6,5. Bei 120°C Senktemperatur und einem Hub von 70°C können noch immer COPs von 2,2 bis 2,8 erreicht werden. (Cordin Arpagaus, 2019)

3.2 Marktübersicht

In den letzten Jahren stieg das Angebot von Wärmepumpen mit hoher Heizleistungen und hohen Vorlauftemperaturen stetig an. Abbildung 26 gibt einen Überblick über die derzeit wichtigsten, sich im Einsatz befindenden Hochtemperaturwärmepumpen. Die Höhe der Vorlauftemperatur wird maßgeblich durch die Auswahl des Verdichters, des Kältemittels und der Auslegung des Kreislaufs bestimmt. Als Wärmequelle werden bei folgenden Anlagen hauptsächlich Wasser, Sole, Abluft oder Abwasser im Bereich zwischen 17°C und 65°C eingesetzt. (Cordin Arpagaus, 2019)

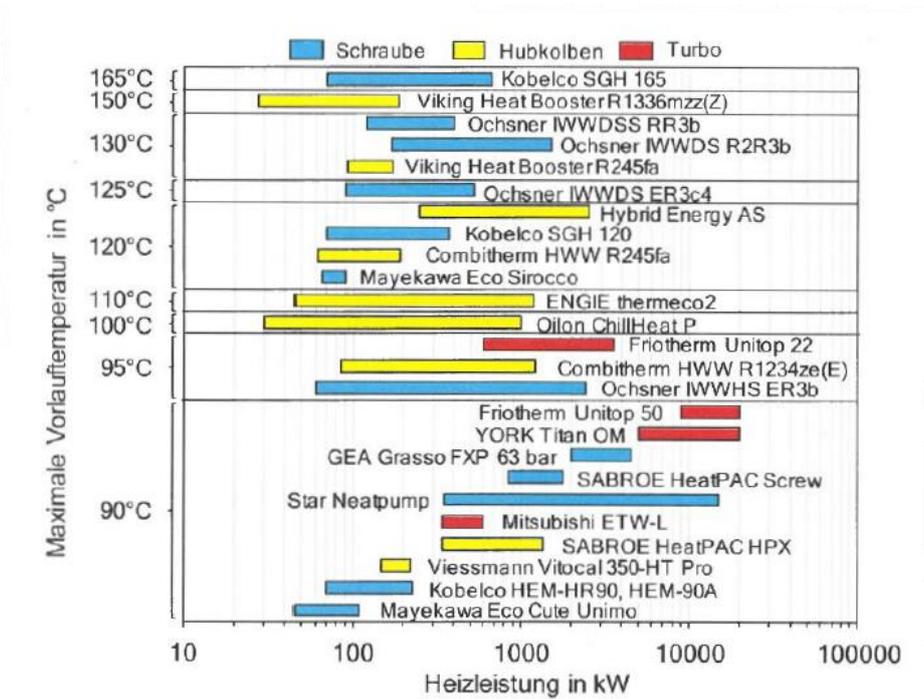


Abbildung 26: Marktübersicht wichtiger Hochtemperaturwärmepumpen (Cordin Arpagaus, 2019)

Die Leistungszahlen von Hochtemperaturwärmepumpen befinden sich hinter erreichten Laborwerten. Der COP von Kleinwärmepumpen (4 bis 16 kW) bewegt sich aktuell zwischen 3,6 für Luft/Wasser-Wärmepumpen und 4,7 für Sole/Wasser-Wärmepumpen. (Cordin Arpagaus, 2019)

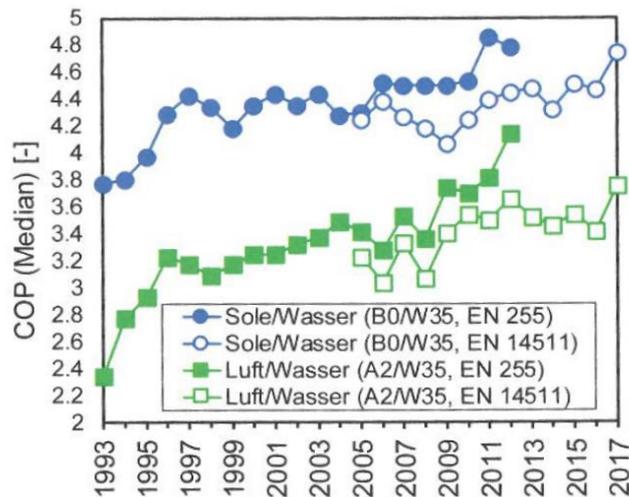


Abbildung 27: Entwicklung des COP von Kleinwärmepumpen am Markt (Cordin Arpagaus, 2019)

Historisch gesehen zeigt die Entwicklung der gemessenen Leistungszahlen nach oben. Grund dafür ist der Fortschritt in der Wärmepumpenforschung. Besondere Verbesserungen haben die Komponenten der Wärmeübertragung, der optimierten Regelung und der Verdichtung erfahren.

Folgende Fit-Kurve (Abbildung 28) beschreibt die COP-Werte von großen industriellen Hochtemperaturwärmepumpen bei 45% Gütegrad. Dabei bewegt sich der COP zwischen 1,6 und 5,8. Positive Auswirkungen auf den COP haben hier eine geringe Temperaturdifferenz (kleiner Hub), Dauerbetrieb unter Vollast und gleichzeitige Nutzung von Wärme und Kälte aus der Wärmepumpe. (Cordin Arpagaus, 2019)

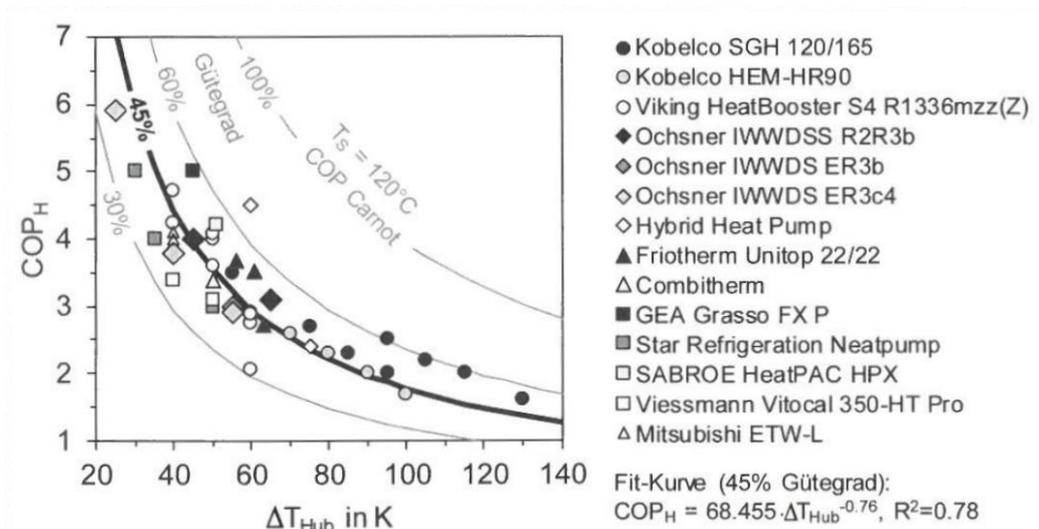


Abbildung 28: COP ausgewählter industrieller Hochtemperaturwärmepumpen abhängig vom Hub (Cordin Arpagaus, 2019)

Hochtemperaturwärmepumpen sind besonders für den Einsatz von Wärmerückgewinnung in industriellen Prozessen wie Trocknung, Sterilisation, Verdampfung, Papierherstellung und Lebensmittelzubereitung geeignet. Für Prozesswärme zwischen 100°C und 150°C kann am europäischen Markt ein Potential von 113PJ angenommen werden. (Cordin Arpagaus, 2019)

Derzeit gibt es 26 Hochtemperaturwärmepumpenmodelle, die von 15 verschiedenen Herstellern vertrieben werden. In industrieller Anwendung außerhalb des Labors stellen der Dampferzeuger Kobelco SGH 160 mit 160°C Vorlauftemperatur und der HeatBooster von Viking mit 150°C den Benchmark dar. Die breite Masse der Modelle befindet sich zwischen 100°C und 140°C und haben einen einstufigen Kreislaufprozess. (Cordin Arpagaus, 2019)

3.3 Potentielle Einsatzgebiete

Industrielle Prozesse haben eine Vielzahl von Anforderungen, die in den meisten Fällen nur einen kleinen Raum für Lösungen zulässt. So ist auch der Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen von einer Vielzahl von Faktoren abhängig.

Die wichtigste Abgrenzung ist das technische Potential für HTWP. Arpagaus hat die europäischen Daten (Eurostat) von 2012 ausgewertet:

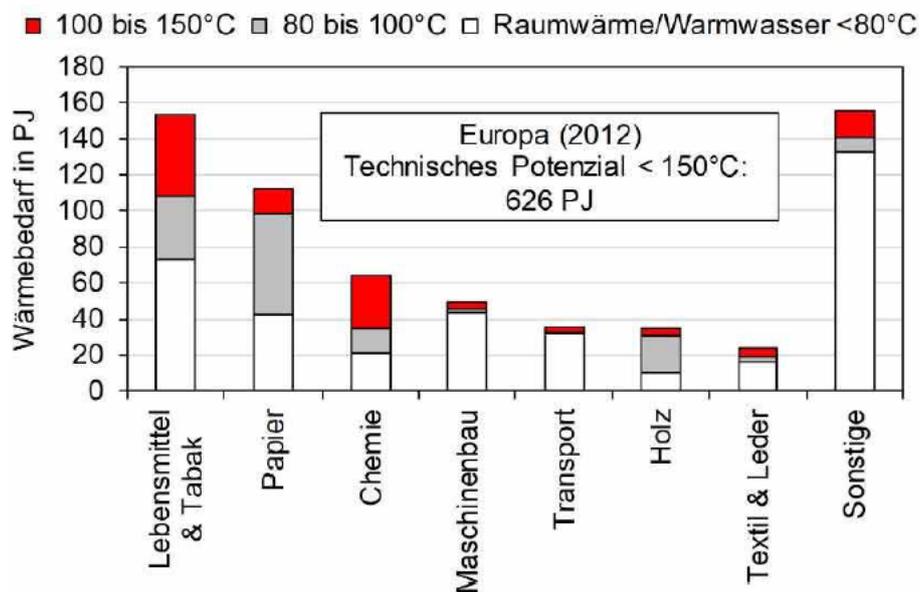


Abbildung 29: Technisches Potential von HTWP in Europa 2012 (Cordingeneric Arpagaus, 2019)

Für HTWP-Anwendungen interessant sind Senktemperaturen über 80°C, die von gewöhnlichen Wärmepumpen nicht abgedeckt werden können. Hier stehen speziell 3 Industriesparten hervor:

- Lebensmittel- und Tabak
- Papier
- Chemie

Insgesamt beläuft sich das technische Potential auf 256 PJ möglicher HTWP-Anwendungen in Europa 2012. (Cordingeneric Arpagaus, 2019)

Hochtemperaturwärmepumpen haben den Vorteil, dass sie mit einem weiten Bereich von Vorlauftemperaturen arbeiten können. Mit Hilfe einer Pinch-Analyse¹³ lässt sich eine optimale Integration von HTWP in Prozesse feststellen. Anders als andere Hochtemperaturwärmeerzeuger haben HTWP den Vorteil, dass sie durch Wärmeentnahme auf der Wärmequellenseite auch kühlen können. Das kann die Wärmerückgewinnung verbessern und die Systemeffizienz steigern. Durch die hohe Flexibilität können eine Vielzahl von Wärme- und Abwärmeströme für einen Vorlauf genutzt werden. (Wilk, Windholz, Hartl, Fleckl, u. a., 2017)

3.3.1 Lebensmittel und Tabakindustrie

Die Lebensmittel- und Tabakindustrie weist das größte technische Potential für den Einsatz von HTWP auf. In der Nahrungsmittelproduktion sinkt der Energieverbrauch seit Jahren stetig. Prozesse werden effizienter und es wird ganzheitlicher geplant. Energieintensive Prozesse, wie Sterilisation und Trocknung, können unter gewissen Voraussetzungen auch mit HTWP effizient realisiert werden. Abwärme fällt bei einem Großteil der Prozesse an, so kann Wärme entzogen und auf höheres Temperaturniveau gehoben werden. Aber auch das Vorheizen von Prozesswärme aus einem Abwärmestrom kann einen erheblichen Effizienzgewinn bedeuten. (Wilk, Windholz, Hartl, Fleckl, Fluch, Grubbauer, Brunner, Lange, Wertz und Ponweiser, 2017)

3.3.2 Papierindustrie

Auch in der Papierindustrie wird eine große Menge an Prozesswärme für unterschiedliche Prozesse benötigt. Hier können HTWP mit Abwärmeströmen arbeiten und die maximal 130°C, die während den Prozessen der Zellstoffherstellung anfallen mit hoher Effizienz zur Verfügung stellen. Das Temperaturniveau der anderen integrierbaren Prozesse rangiert um die 80°C - 110°C und ist somit ohne Probleme zu bewerkstelligen. (Bogdanov, 2018)

3.3.3 Chemieindustrie

Die Chemieindustrie ist eine sehr vielfältige Sparte, die einen sehr großen Bereich von Prozessen abdeckt, der Prozesswärme zwischen 80°C und 150°C benötigt. Auch hier liegt der Fokus auf Abwärmennutzung, um Prozesswärme bereitzustellen, oder auf ein hohes Temperaturniveau vorzuheizen, um mit niedrigeren Energieeinsatz den verbleibenden Temperaturhub anderweitig zu bewältigen. (Bogdanov, 2018)

¹³ Eine Pinch-Analyse ist ein verfahrenstechnisches Instrument, um den theoretisch minimal möglichen Energiebedarf für Kälte- und Wärmebereitstellung zu bestimmen. (Veitengruber, 2020)

3.3.4 Nischen

HTWP haben vielfältige Anwendungspotentiale. So kann auch etwa in der Fernwärmeversorgung von dieser Technologie Gebrauch gemacht werden. In den Wärmenetzen der 4. Generation sind große saisonale Wärmespeicher, die partiell oder komplett unter der Erde liegen ein wichtiger Bestandteil. Diese werden über den Sommer von Solarthermie oder industrieller Abwärme aufgeheizt.

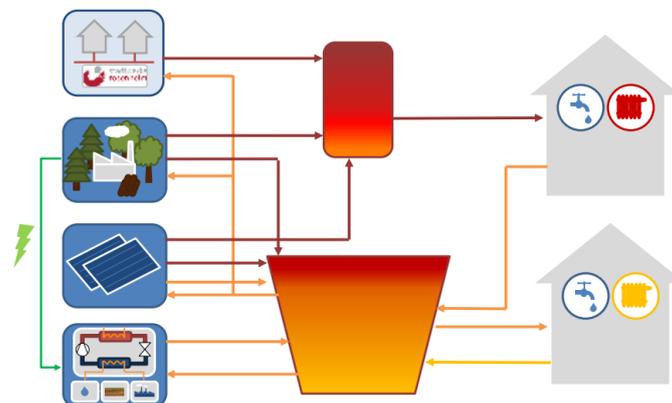


Abbildung 30: Schematische Darstellung des Speicherkonzepts eines solarthermischen Speichers mit einer Hochtemperaturwärmepumpe (Kleinertz, Faber und Roon, 2019)

Wie in Abbildung 30 beschrieben kann die HTWP dabei helfen, ein BHKW voll auszulasten und gleichzeitig effizient Energie auf das Niveau des Speichers zu heben. Diese Temperaturen befinden sich am unterem Bereich der Definition einer HTWP ($\sim 80^{\circ}\text{C}$). (Kleinertz, Faber und Roon, 2019)

Ein weiterer Ansatz für die Nutzung von HTWP im Fern- und Nahwärmenetz ist die direkte Nutzung des Rücklaufs. Hierbei wird direkt dem Rücklauf Wärme entzogen und mit der HTWP auf hohes Vorlaufniveau gehoben. Vorteil dabei ist, dass der Prozess einfach und effizient gestaltet werden kann. (Ochsner, 2013)

Eine Einschränkung, die Hochtemperaturwärmepumpen betrifft ist auf der Quellenseite zu finden. Natürliche Quellen unter 40°C sind aufgrund der hohen geforderten Senktemperaturen mit einer HTWP schwer erreichbar. (Klein, 2009)

Eine Abhilfe schafft das Nutzen von kaskadierten Systemen, wie in 2.2.2.1 beschrieben. So kann jede Kaskade auf ihr Temperaturniveau abgestimmt werden und einen großen Temperaturhub effizient bewerkstelligen. Das macht auch das Nutzen von Niedertemperaturquellen für Hochtemperaturanwendungen interessant.

3.4 Forschungsbedarf und Verbesserungspotentiale

Während Wärmepumpen per se schon lange Marktreife erreicht haben und gerade im 21. Jahrhundert einen Boom erleben, haben HTWP noch einige Herausforderungen zu bewältigen, um in einer großen Bandbreite von Anwendungsgebieten zum Einsatz zu kommen

3.4.1 Wirtschaftlichkeit

Wirtschaftliche Kennzahlen sind ein gewichtiger Faktor bei der Auswahl von industriellen Anlagen. Einer der größten Nachteile der HTWP bezüglich ihrer wirtschaftlichen Betrachtung sind hohe Anschaffungskosten im Vergleich zu anderen Hochtemperatur-Erzeugern. Hauptgrund für die hohen Anschaffungskosten sind vielfältig. Einerseits gibt es auf dem kleinen Markt noch sehr wenige Hersteller von HTWP, andererseits sind für jeden industriellen Einsatz maßgeschneiderte Lösungen vonnöten, was sich in höheren Investitionskosten niederschlägt. Eine weitere wichtige Kenngröße ist die Amortisationszeit¹⁴. Diese beträgt meist < 3 Jahre, was in den meisten Fällen nur durch hohe Gaspreise und niedrige Strompreise erreicht werden kann. (Arpagaus, 2017)

HTWP-Hersteller können aktiv gegensteuern. Die Produkte sind bisher wenig bekannt, genauso wie die möglichen Anwendungsbereiche. Durch Aufklärungsarbeit von Herstellerseite kann die Industrie auf einen großen Teil der Planung und Konzeptionierung verzichten und auf fertige Lösungen der Hersteller zurückgreifen. Eine bessere Vernetzung und Kommunikation kann Barrieren und Vorurteile abbauen. (Arpagaus, 2017)

Die Möglichkeit Wärme einem Medium zu entziehen und gleichzeitig effizient Hochtemperatur-Prozesswärme bereitzustellen ist ein gewichtiges Argument für die HTWP. Richtig eingebunden in Prozesse kann sie den Systemwirkungsgrad verbessern und so zu einer Kostenersparnis und einem Effizienzgewinn beitragen.

Abbildung 31 zeigt die Verknüpfung des Rohölpreises mit der Forschungsarbeit an und mit HTWP. Hauptkonkurrent am Markt sind fossile Feuerungsanlagen, deren wirtschaftlicher Erfolg stark vom Öl- und Gaspreis abhängen. Starke Fluktuationen können Unsicherheit in der Kostenberechnung auslösen und erhöhen den Wunsch nach stabilen und effizienten Alternativen. (Cordingeneric Arpagaus, 2019)

¹⁴ Amortisationszeit ist die Zeitspanne, die eine Anlage benötigt, um durch erzielte Gewinne die Anschaffungskosten zu decken (Herkert, 2021)

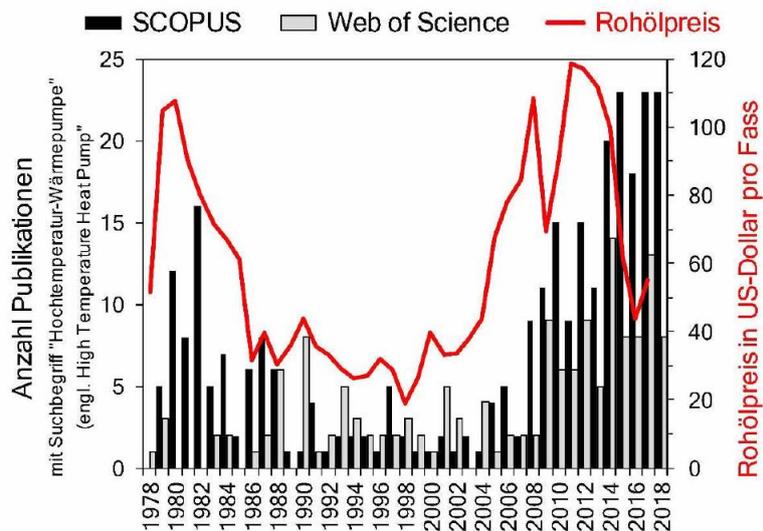


Abbildung 31: Anzahl der Publikationen mit HTWP-Kontext in Relation zum Rohölpreis (Cordingeneric Arpagaus, 2019)

3.4.2 Kältemittel

Arpagaus gibt in einem Vortrag aus dem Jahr 2019 den Forschungsbedarf an HTWP an:

- Einsatz von Kältemitteln mit niedrigem GW
- Einsatz von natürlichen Kältemitteln
- Erweiterung der Grenzen für Senktemperaturen
- Steigerung des COPs

Ein großer Teil der zukünftigen Herausforderungen HTWP betreffend sind bei der Optimierung und Verbesserung der Kältemittel zu finden. (Cordingeneric Arpagaus, 2019)

Kältemittel unterliegen einer strengen Gesetzgebung, die eine klare Richtung hin zu umweltverträglichen und sicheren Arbeitsmedien vorgibt. Dieser Prozess wurde 1987 mit dem Montreal Protokoll und dem Verbot von FCKWs begonnen und wird seitdem laufend über Verordnungen und internationale Abkommen nachgeschärft. Folgende Eigenschaften sind aus umwelts- und sicherheitstechnischer Sicht erwünscht:

- $ODP^{15} = 0$. Keine Gefährdung für die Ozonschicht durch entweichendes Kältemittel.
- Niedriges GWP. Entweichtes Kältemittel darf keinen starken Treibhauseffekt verursachen.
- Kurze atmosphärische Lebensdauer. Schnelles zersetzen in der Atmosphäre.
- Keine toxischen oder giftigen Eigenschaften.
- Nicht brennbar

¹⁵ Ozon Depletion Potential ist die Fähigkeit des Kältemittels atmosphärisches Ozon abzubauen im Vergleich zum FCKW-Kältemittel R-11 (Bundesministerium für Umwelt, 2021)

Aus technischer Sicht und damit für den Anwender von Interesse sind eine Reihe weiterer Eigenschaften, die noch in Entwicklung sind:

- Hoher COP. Gute Effizienz ist der Schlüssel für wirtschaftliche Überlegungen
- Druckverhältnisse. Niedriger kritischer Druck (< 30 bar)
- Temperatur. Hohe kritische Temperatur (> 150 bar)
- Gute Löslichkeit in Öl
- Materialverträglichkeit mit Stahl und Kupfer
- Am Markt verfügbar. Gute Verfügbarkeit von neuen Kältemitteln ist oft ein Problem.
- Niedriger Preis. Kann in wirtschaftlichen Abwägungen eine Rolle spielen.

Die Industrie forscht bereits mit Hochdruck an neuen Kältemitteln. Da mit aktuellem Stand der Technik nicht alle dieser Eigenschaften in einem Kältemittel vereint werden können, gilt es Kompromisse bei einigen Faktoren zu schließen. (Cordingeneric Arpagaus, 2019)(Arpagaus, 2017)

Einige neue Kältemittel mit vielversprechenden Eigenschaften haben bereits den Markt für HTWP betreten. Eines davon ist *R1336mzz-Z*, welches von der Firma *Chemours* entwickelt wurde. Es gilt als Ersatzkältemittel für R123 und R245fa. Die Vorteile dieses Kältemittels sind eine hohe kritische Temperatur (171,3°C) bei einem niedrigen kritischen Druck (29 bar). Mit einem geringen GWP von < 2, keiner Entzündlichkeit und einem ODP = 0 ist dieses Kältemittel bis etwa 160°C einsetzbar. Von der Materialverträglichkeit ähnelt es R245fa. (Arpagaus, 2017)

R600 und *R601* sind Vertreter sogenannte natürliche Kältemittel ohne Ozonabbaupotential. Sie besitzen ein sehr kleines GWP (20), sind leicht verfügbar, billig und haben sehr hohe kritische Temperaturen (152°C und 196,6°C). *R600* gilt als geeignet für HTWP bis 120°C, jedoch ist aus sicherheitstechnischer Sicht die hohe Entflammbarkeit zu beachten, weshalb höhere Sicherheitsstandards notwendig sind. Diese begrenzen gewerbliche Systeme, die eine Überwachung sicherstellen, mit 2,5 kg Füllmenge. (Arpagaus, 2017)

4 Ziel- und Forschungsfragen

Ziel dieser Arbeit ist es, das Potential von Hochtemperaturwärmepumpen aufzuzeigen und durch Versuche mit einer Hochtemperaturwärmepumpe Effizienzanalysen durchzuführen.

Effiziente Wärmebereitung im Hochtemperaturniveau wird in Zukunft eine wichtigere Rolle einnehmen. HTWP können dazu einen wichtigen Teil beitragen. Daraus ergibt sich die erste Forschungsfrage:

- *Basierend auf dem Stand der Technik, in welchen Einsatzgebieten werden Hochtemperaturwärmepumpen in Zukunft effizient eingesetzt werden können und was sind zukünftige Herausforderungen dieser Technologie? Wo besteht noch Forschungsbedarf, um die Einsatzbereiche zu erweitern?*

Im Vordergrund des praktischen Teils der Diplomarbeit steht das Arbeiten mit der Hochtemperaturwärmepumpe am Standort Türkenschanze. Diese Anlage wurde zuvor mit dem Kältemittel R365mfc betrieben, bevor es durch R245fa ersetzt wurde. Es wurden mit diesem Kältemittel Versuche durchgeführt und die Ergebnisse mitprotokolliert. Aus diesem Sachverhalt ergibt sich die zweite Forschungsfrage:

- *Bietet R245fa bei bestehenden Versuchsparametern eine Verbesserung gegenüber R365mfc?*

Parallel dazu wird im Simulationsprogramm IPSEpro das Wärmepumpenmodell nachgebaut und mit den gleichen Parametern gefüttert. Daraus ergibt sich die dritte Forschungsfrage:

- *Welche Ergebnisse liefern die gleichen Versuche im Simulationsprogramm IPSEpro?*

5 Methodik

Diese Arbeit umfasst einen Literatur- und einen praktischen Teil. Der Literaturteil besteht aus technischen Grundlagen, einer status quo- und Marktübersicht und einem Ausblick in die Zukunft die Hochtemperaturwärmepumpentechnologie. Für die technischen Grundlagen werden hauptsächlich anerkannte Standardwerke, wie Baehrs *Thermodynamik* oder Eders *Die Wärmepumpe in der Verfahrenstechnik* verwendet. Für den spezifischen Theorieteil, der Hochtemperaturwärmepumpen betrifft, wird zu einem großen Teil auf die Literatur von Arpagaus zurückgegriffen. Er gilt als anerkannter Experte in diesem Gebiet und bietet eine Vielfalt an Literatur.

Die Versuche werden mit Python im Programm PyCharm ausgewertet. Das hat den Vorteil von hoher Flexibilität, da es sich um ein Open-Source Produkt handelt.

5.1 Versuchsdurchführung

Um unterschiedliche Temperaturniveaus zu untersuchen, wird eine Versuchswärmepumpe am Standort Peter-Jordan Straße 82 verwendet. Es werden eine Reihe von Versuchen durchgeführt, deren Ergebnisse dann mit Simulationen in IPSEpro verglichen werden sollen.

5.1.1 Prüfstand

Der Prüfstand mit der Wärmepumpe befindet sich in der Prüfhalle des Schwackhöfer-Hauses am Standort Türkenschanze. Wie in Abbildung 32 besteht der Hochtemperaturwärmepumpenprüfstand aus 3 verschiedenen Teilen. Wie unten ersichtlich, befinden sich auch eine Reihe von Temperatur-, Durchfluss- und Drucksensoren an der Anlage. Diese werden mit den Anfangsbuchstaben T (Temperatur), P (Druck) und F (Durchfluss) nummerisch geführt.

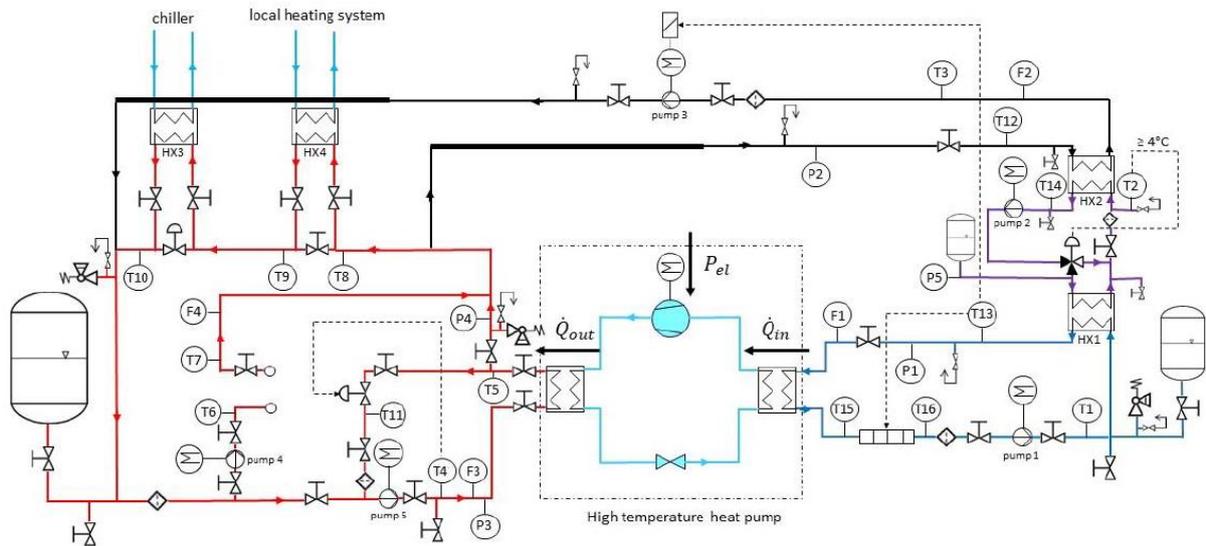


Abbildung 32: Schematischer Aufbau Versuchswärmepumpe (Wolf, Hoffmann, Saxinger und Pröll, 2018)

5.1.1.1 Hochtemperaturwärmepumpe

Das Kernstück der Versuchsanlage bildet die Hochtemperaturwärmepumpe. Diese besteht aus einem Kolbenverdichter der Firma Goeldner mit 4,4 kW Leistung, einer Drossel und jeweils einem Wärmeübertrager an der Wärmesenke und Wärmequelle. Als Kältemittel befindet sich, wie in Punkt 2.3 beschrieben, R245fa. Die Wärmepumpe befindet sich in einem separaten Teil der Anlage, der mit den notwendigen Schnittstellen zum Datenauslesen ausgestattet ist.

Durch Kugelhahnventile lässt sich der innere Wärmetauscher (Rekuperator) zu- und weg-schalten. Dadurch kann die Wärmepumpe sowohl mit als auch ohne rekuperativer Sauggas-überhitzung betrieben werden.

5.1.1.2 Quellenkreis

Der Quellenkreis wird in der Abbildung 32 blau dargestellt. Die Wärmepumpe entzieht diesem Kreis Wärme. Der Quellkreis ist mit einem Wärmeübertrager mit der Hochtemperaturwärmepumpe verbunden. Dadurch kann dieser Kreis mit Wasser als Arbeitsmedium betrieben werden. Die Quellenkreistemperatur wird durch einen elektrischen Heizstab (Abbildung 33) auf einem voreingestellten Niveau gehalten. Dieser befindet sich zwischen den Temperatursensoren T15 und T16. Die gewünschte Quellenkreistemperatur wird mit T16_soll bezeichnet. Der Heizstab regelt über T16 damit die Temperatur.



Abbildung 33: Heizstab mit Temperatursensoren T15 und T16

Der gesamte Quellkreis wird über eine Grundfos Magna 3 zum Zirkulieren gebracht. Diese Pumpe stammt aus der Heizungstechnik und wird meist als Umwälzpumpe eingesetzt. (Grundfos, 2020)

5.1.1.3 Senkenkreis

Der Wärmesenkenkreis ist der Kreis, der die Wärme der Wärmepumpe aufnimmt und wird in der Abbildung 32 rot dargestellt. Dieser ist komplizierter aufgebaut als der Quellkreis. Gleich wie im Quellkreis wird der Senkenkreis über einen Wärmeübertrager mit der Hochtemperaturwärmepumpe verbunden. Da hier jedoch hohe Temperaturniveaus jenseits 100°C herrschen können, wird der Druck in diesem Kreis künstlich erhöht¹⁶, um einer Dampfbildung entgegen zu wirken. Die Solltemperatur wird über den Wert T4_soll voreingestellt. Der Senkenkreis besteht aus 2 verschiedenen Kreisen wie in Abbildung 34 dargestellt ist:

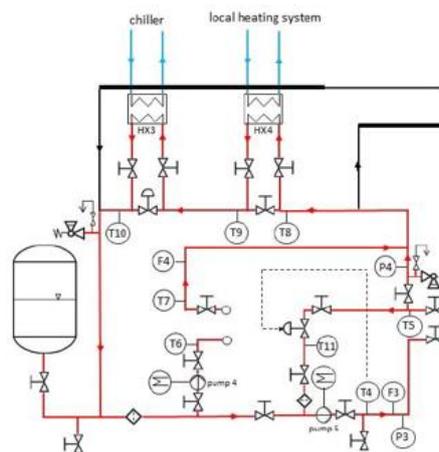


Abbildung 34: Isolierte Darstellung des Wärmesenkenkreis

¹⁶ Das Ausdehngefäß im Senkenkreis wird auf 5 bar Druck über Normaldruck gebracht. Der Senkenkreis hat im Ruhezustand somit 5 bar Druck über Normaldruck.

Der erste Kreis besteht aus einer Rohrleitung, die direkt vom Wärmeübertrager auf der Wärmesenkenseite das erhitze Wasser über T5, T11, Pumpe 5, T4, F3 und P3 wieder zurück zum Wärmeübertrager pumpt.

Der zweite Kreis wird über ein Ventil bei T5 abgezweigt. Dieser läuft über einen Kühler (zwischen T9 und T10). Es ist ein offener Kühlkreis mit Frischwasser direkt am Wärmeübertrager angeschlossen.

Vor der Pumpe 5 mündet der erste Kreis in den zweiten. Um nun die voreingestellte Solltemperatur T4_soll zu erreichen wird der Vorlauf und Rücklauf gemischt. Ein PID-Regler¹⁷ steuert dabei einen Stellmotor, der ein Ventil im wärmeren Kreis öffnet oder schließt und somit die Menge an warmen Wasser, dass dem kalten Vorlauf beigemengt wird kontrolliert.

5.2 Versuche

Um Daten für Simulationen in IPSEpro zu erzeugen und mit diesen weiter arbeiten zu können, ist es notwendig eine Reihe von Versuchen auf der Anlage durchzuführen.

5.2.1 Fragestellungen

Um die Effizienz und andere wichtige Parameter der HTWP im praktischen Test zu dokumentieren, ist es notwendig eine Reihe von Versuche durchzuführen:

Versuchsreihe 1.1		Versuchsreihe 1.2	
Quelltemperatur [°C]	Senktemperatur [°C]	Quelltemperatur [°C]	Senktemperatur [°C]
40	120	40	130
45	120	45	130
50	120	50	130
60	120	60	130
70	120	70	130
80	120	80	130

Tabelle 4: Versuchsreihen 1.1 und 1.2

¹⁷ Der PID-Regler ist ein sehr weit verbreiteter Regler. Er besteht aus einem proportionalem, integralen und einem differentialen Anteil. Je nach Mischen der jeweiligen Anteile kann der Regler anders auf Abweichungen reagieren. (RN-Wissen, 2014)

Ziel ist es, bei jeder Temperaturstufe möglichst homogene und stationäre Bedingungen und geringe Sollwertabweichungen zu erzielen. Dafür ist das Anpassen des PID-Reglers, sowie des Stellventils und der Durchflussregler (Kugelhähne) nötig.

Analog dazu wird, wie in Kapitel 5.4 Simulation genau beschrieben eine statische Simulation der Versuchsreihen durchgeführt.

5.2.2 Prüfnormen

Um reproduzierbare Laborergebnisse und homogene Standards zu bewerkstelligen sind Normierungen notwendig. Da es noch keine standardisierten Testverfahren für Hochtemperaturwärmepumpen gibt, wird auf Normen von normalen Gebäudewärmepumpen Bezug genommen.

5.2.2.1 EN 14511:2013

In der EN 14511-2 werden in Tabelle 10 für Wasser/Wasser- Wärmepumpen im Heizbetrieb (sehr hohe Temperaturen) wie folgt angegeben:

	Außenwärmeübertrager		Innenwärmeübertrager	
	$T_{\text{Eintritt}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{Austritt}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{Eintritt}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{Austritt}} [^{\circ}\text{C}]$
Norm-Nennbedingungen	10	7	55	65
Betriebs-Nennbedingungen	15	x	x	65

Tabelle 5: Prüfbedingungen für Wasser/Wasser Wärmepumpen nach EN 14511 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2013)

Die Temperaturniveaus sind zwar geeignet, um Wärmepumpen mit hohem Temperaturhub zu testen, jedoch nicht um hohe Austrittstemperaturen jenseits 100°C mit kleiner Quellkreistemperatur zu prüfen. (Deutsches Institut für Normung e. V., 2013)

Die Norm gibt weiter Aufschluss über den Ablauf des Prüfverfahrens. So wird etwa die maximale Messunsicherheit der Messgeräte in EN 14511-3 genau definiert. Weiters gibt die Norm Aufschluss über die Prüfung von Wärmepumpen. Neben Aufbau und Ablauf finden sich auch Testparameter in der Norm wieder. In Tabelle 6 wird die zulässige Abweichung von den Einstellwerten in Kelvin angegeben:

Messgröße	Zulässige Abweichung der arithmetischen Mittelwerte von den Einstellwerten	Zulässige Abweichung der einzelnen Messwerte von den Einstellwerten
Eintrittstemperatur	$\pm 0,2 \text{ K}$	$\pm 0,5 \text{ K}$
Austrittstemperatur	$\pm 0,3 \text{ K}$	$\pm 0,6 \text{ K}$
Volumendurchfluss	$\pm 1 \%$	$\pm 2,5 \%$
Statische Druckdifferenz	-	$\pm 10 \%$

Tabelle 6: Zulässige Abweichung von den Einstellwerten (Deutsches Institut für Normung e. V., 2013)

Ein stationärer Zustand stellt sich ein, wenn alle Messgrößen über eine Zeitspanne von mindestens 30 Minuten ohne Änderung der Einstellwerte innerhalb der zulässigen Abweichungen bleiben. Zugelassen sind regelungstechnisch bedingte Schwankungen der Messgrößen, jedoch darf der Mittelwert dieser Abweichungen nicht den zulässigen Bereich des arithmetischen Mittelwertes überschreiten. (Deutsches Institut für Normung e. V., 2013)

Die Norm legt auch die Grenzwerte der Messunsicherheiten fest. Diese sind wie folgt definiert:

Messgröße	Einheit	Messunsicherheit
Temperaturdifferenz	K	$\pm 0,15 \text{ K}$
Temperatur am Eintritt/Austritt	K	$\pm 0,15 \text{ K}$
Volumendurchfluss	m^3/s	$\pm 1 \%$
Statische Druckdifferenz	kPa	$\pm 1 \text{ kPa}$ oder $\pm 5 \%$
Elektrische Leistung	W	$\pm 1 \%$
Spannung	V	$\pm 0,5 \%$
Strom	A	$\pm 0,5 \%$
Elektrische Energie	kWh	$\pm 1 \%$

Tabelle 7: Grenzwerte für Messunsicherheiten (Deutsches Institut für Normung e. V., 2013)

5.3 Datenauswertung

Die Daten, die die Wärmepumpe loggt, werden in csv-files (comma separated values) geschrieben und können dann am Computer weiterverarbeitet werden. Die Plattform, die für die Datenauswertung genutzt wird, ist die Programmiersprache Python.

5.3.1 Python

Python ist eine universelle Programmiersprache. Sie ist objektorientiert¹⁸ und Open-Source und für alle gängigen Betriebssysteme zugänglich. Python hat eine Vielzahl von Modulen und Paketen, die eine große Zahl von Anwendungen möglich machen. Python sticht durch seine große Flexibilität und Nutzerfreundlichkeit unter den Programmiersprachen hervor, weshalb auch viele Unternehmen bereits Python verwenden. (python.org, 2020)

Unter Verwendung von Python 3.7 werden die csv-files eingelesen. Anschließend werden die Daten auf die richtigen Einheiten konvertiert. Weiters wurden die zu untersuchenden Intervalle ausgewählt. Dafür wurden einige Zeitintervalle geplottet. Von jedem Zeitintervall wurde dann von allen Werten ein Mittelwert gebildet. Dieser soll möglichst wenig vom Sollwert abweichen. Das Zeitintervall mit der geringsten Abweichung wurde dann herausgenommen und die Daten des Intervalls geglättet und auf fehlerhafte Werte untersucht. Für jede Temperaturstufe blieb ein Intervall über, das für weitere Untersuchungen herangezogen wurde.



Abbildung 35: Datenbearbeitungsprozess

5.4 Simulation

Um die Ergebnisse der Versuchsreihen mit theoretisch errechneten Werten vergleichen zu können, wurde ein Modell einer Hochtemperaturwärmepumpe im Programm IPSEpro erstellt und mit den Daten der jeweiligen Versuche verglichen.

5.4.1 IPSEpro

IPSEpro ist ein Prozesssimulationsprogramm des Unternehmens SimTech. IPSEpro besteht aus verschiedenen Komponenten. Eine davon ist das MDK (Model Development Kit). Mit dem MDK kann der Benutzer selbstständig Modelle und dazugehörige Bibliotheken erstellen. Im PSE (Process Simulation Environment) kann durch Bausteine und Verknüpfungen graphisch ein Modell erstellt werden. Diese Modelle sind statisch und eignen sich besonders, Prozesse hinsichtlich ihrer Massen- und Energiebilanzen zu untersuchen. Durch das leichte Erweitern der großen Modellbibliotheken ist IPSEpro für eine Vielzahl von Anwendungen geeignet. (SimTech, 2018)

¹⁸ Objektorientiertes Programmieren ist ein Programmierparadigma für das die Kapselung von Daten und Code in Objekten charakteristisch ist. Das hat eine höhere Flexibilität zur Folge. (dev-insider, 2020)

5.4.2 Aufbau

Um einen Vergleich zwischen theoretischen und empirischen Werten herzustellen, ist es notwendig Ipse-Modelle aufzustellen. So können alle Temperaturstufen der Versuche in den Modellen nachgebaut werden.

Die Modelle werden wie folgt aufgebaut:

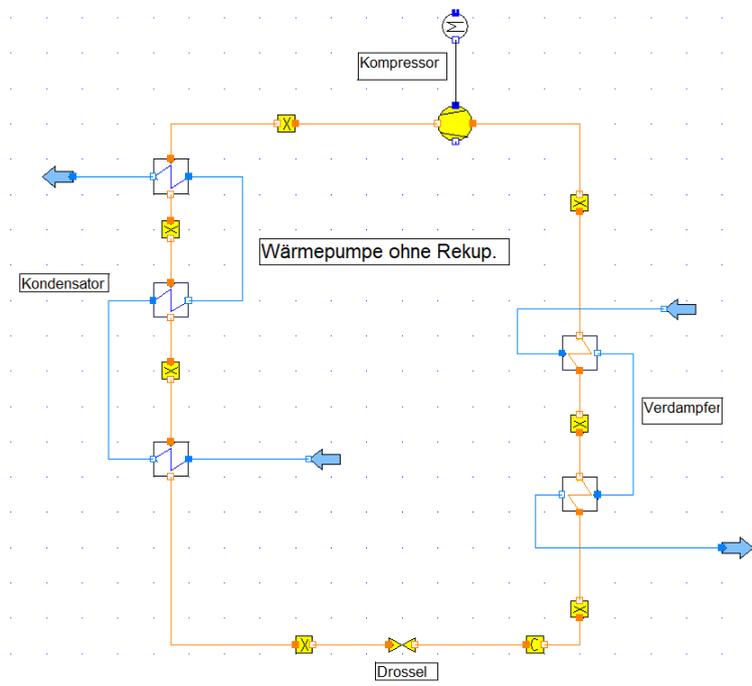


Abbildung 36: IPSEpro-Modelle

In Abbildung 36 ist das Wärmepumpenmodell zu sehen. Es besteht aus einem Verdampfer, einem elektrisch angetriebenen Verdichter, einem Kondensator und einer Drossel. Der Verdampfer wird in IPSEpro mit 2 Wärmeübertragern (Verdampfer, Überhitzer) modelliert, die das Arbeitsgas R245fa mit heißem Wasser verdampfen. Der Dampfgehalt x^{19} zeigt dabei den Zustand des Kühlmittels an. Danach gelangt das verdampfte Kühlmittel in den Kompressor. Dieser wird mit einem Elektromotor betrieben und simuliert den Stromverbrauch des realen Kompressors. Anschließend kommt das Kühlmittel in den zweistufigen Kondensator. Hier wird das Medium mittels Wasser in den Wärmeübertragern kondensiert. Das Kühlmittel wird schlussendlich in der Drossel entspannt, bevor es wieder in den Verdampfer gelangt.

¹⁹ Der Dampfgehalt x gibt das Verhältnis von der Masse des gesättigten Dampfes (vollständig verdampft) zur Masse des nassen Dampfes (siedende Flüssigkeit) an. x kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Für den gesättigten Dampf ist $x = 1$ und für die siedende Flüssigkeit ist $x = 0$. (Baehr und Kabelac, 2012)

6 Ergebnisse

In folgenden Punkten werden die Ergebnisse der Versuche, der Datenauswertung und der Simulationen dargestellt.

6.1 Ergebnisse der Versuche

Als erstes werden die Versuchsreihen 1.1 und 1.2 durchgeführt. Begonnen werden die Versuchsreihen jeweils mit der niedrigsten Quelltemperatur (40°C). Wie in der EN 14511:2013 festgelegt, wird jede Temperaturstufe 30 Minuten möglichst konstant gehalten. Alle 2 Versuchsreihen generieren jeweils 2 csv-Dokumente, in denen sämtliche Messwerte mitgeloggt werden. Das Kontrollpanel der Wärmepumpe, wo Sollwerteinstellungen vorgenommen werden, loggt folgende Daten in Sekundenintervallen:

Datentyp	Beschreibung	Einheit
D	Zeitstempel	WT M T U J ²⁰
T1-T16	Temperaturwerte	[°C] * 1000
T4_soll	Sollwert Senktemperatur	[°C] * 1000
T16_soll	Sollwert Quelltemperatur	[°C] * 1000
Durchfluss 1 – Durchfluss 4	Durchflussmesser	[m ³ /h] * 100
p1 – p3	Druckmesser	[bar] * 1000
Wirkleistung	Leistung	[W] * 10
Scheinleistung	Produkt aus Wirkleistung und Blindleistung	[VA] * 10
Blindleistung	Leistung zwischen Quelle und Verbraucher	[var] * 10
cos_phi	Verhältnis Wirkleistung zu Scheinleistung	$0 \leq \cos_phi \leq 1$
Modus	Betriebsart	Wärmepumpenprüfung

Tabelle 8: Datenreihen am Hauptpanel

²⁰ WT (Wochentag), M (Monat), T (Tag des Monats), U (Uhrzeit HH:MM:SS), J (Jahr)

Direkt an der Wärmepumpe befindet sich eine Schnittstelle, um die Daten der Messstellen der Wärmepumpe auszulesen. Diese Daten werden auf eine Micro-SD Karte gespeichert, die anschließend auf einem Rechner mit dem Programm Winsol²¹ als csv-Dokument exportiert werden können. Folgende Datenreihen werden von der Hochtemperaturwärmepumpeneinheit erfasst und in 10 Sekunden-Intervallen mitgeloggt:

Datentyp	Beschreibung	Einheit
Datum	Datum	TT.TM.JJJJ
Uhrzeit	Uhrzeit	HH:MM:SS
WMZ Heizkreis	Wärmemengenzähler Heizkreis	[kW]
WMZ Wärmequelle	Wärmemengenzähler Wärmequelle	[kW]
Durchfluss Heizung	Volumenstrom Heizung	[l/h]
Durchfluss Wärmequelle	Volumenstrom Wärmequelle	[l/h]
Heißgastemperatur	Temperaturwert	[°C]
Unterkühlungstemperatur	Temperaturwert	[°C]
Kondensationstemperatur	Temperaturwert	[°C]
Ergebnis Verdampfungstemperatur	Temperaturwert	[°C]
T. Heizkreis VL	Temperaturwert	[°C]
T. Heizkreis RL	Temperaturwert	[°C]
Verdampfer Austrittstemp	Temperaturwert	[°C]
Sauggastemperatur	Temperaturwert	[°C]
Eintritt Wärmequelle	Temperaturwert	[°C]
Austritt Wärmequelle	Temperaturwert	[°C]
Expansionsventil	Stellung Expansionsventil	[V]
Verdichter	Verdichter ein/aus	-
Pumpe Kopfkühler	Pumpe ein/aus	-

²¹ Winsol ist ein Programm von *Technische Alternative* um Loggingdaten auszulesen und darzustellen (TA, 2020)

Ventilator Kühler	Ventilator ein/aus	-
Kurbelwannenheizung	Heizung ein/aus	-

Tabelle 9: Datenreihen der Hochtemperaturwärmepumpe

Die Daten der beiden Logger haben einen synchronisierten Zeitstempel, sodass diese parallel verarbeitet werden können.

6.1.1 Messergebnisse

Die Anlage wird auf die Sollgrößen T4_soll und T16_soll geregelt. Damit orientiert sich die Messwertabweichung primär an den Abweichungen von T4 und T16 an ihren jeweiligen Soll-Werten. In der folgenden Tabellen finden sich Zusammenstellungen der wichtigsten Parameter der Messreihe 1.1:

Versuch	T16_soll [°C]	T16 [°C]	T4_soll [°C]	T4 [°C]	Wirkleistung [kW]
40_120	40	39,98	120	120,09	2,98
45_120	45	Fehler	120	Fehler	Fehler
50_120	50	49,95	120	119,7	3,79
60_120	60	60,05	120	119,68	4,27
70_120	70	70	120	120,16	4,36
80_120	80	79,96	120	120,12	4,39

Tabelle 10: Messergebnisse der Versuchsreihe 1.1

Die Messerergebnisse der Versuchsreihe 1.2 lassen sich wie folgt abbilden:

Versuch	T16_soll [°C]	T16 [°C]	T4_soll [°C]	T4 [°C]	Wirkleistung [kW]
40_130	40	39,78	130	130,07	2,94
45_130	45	44,96	130	129,66	3,43
50_130	50	49,94	130	129,99	3,88
60_130	60	59,98	130	130,19	4,77
70_130	70	69,99	130	130,31	4,96
80_130	80	79,95	130	130,42	5,02

Tabelle 11: Messergebnisse der Versuchsreihe 1.2

6.1.2 Ergebnisse der elektrischen Leistungsmessung

Der Kolbenkompressor der Versuchsanlage wird von einem Elektromotor angetrieben. Des-
sen Betrieb wird von 4 wichtigen Leistungsparametern gekennzeichnet:

- Wirkleistung
- Blindleistung
- Scheinleistung
- $\cos(\varphi)$

Diese Parameter bestimmen, wie effizient der Kompressor zu einem gewissen Zustand arbei-
tet.

Für die Versuchsreihe 1.1 mit Senktemperatur bis 120°C ergeben sich für die verschiedenen
Versuche folgende gemittelte $\cos(\varphi)$:

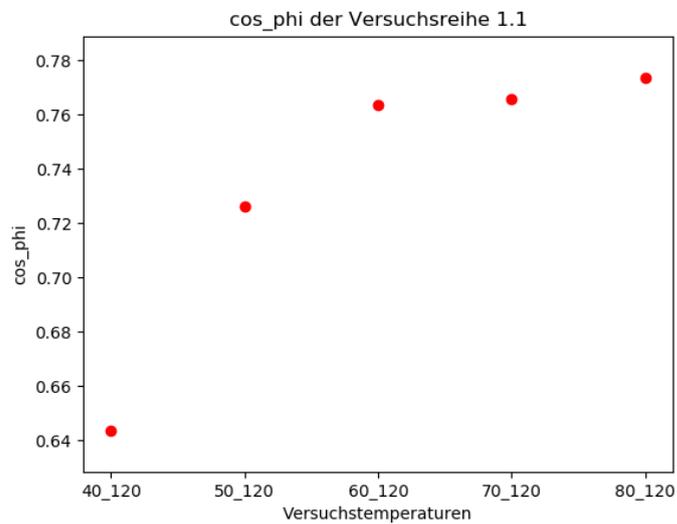


Abbildung 37: $\cos(\varphi)$ der Versuchsreihe 1.1

Wirk-Blind und Scheinleistungen für die Versuchsreihe 1.1 lassen sich wie folgt darstellen:

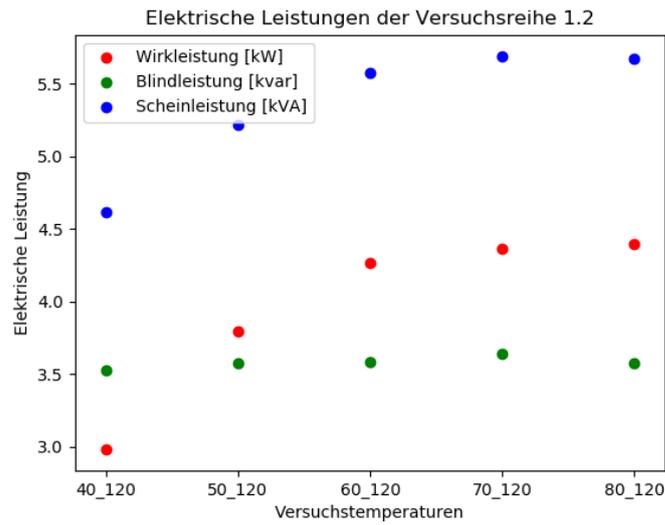


Abbildung 38: Elektrische Leistungsparameter der Versuchsreihe 1.1

Analog dazu wurde für die Versuchsreihe 1.2 mit Senktemperaturen bis 130°C die Leistungsparameter erhoben. Folgende $\cos(\varphi)$ lassen sich gemittelt darstellen:

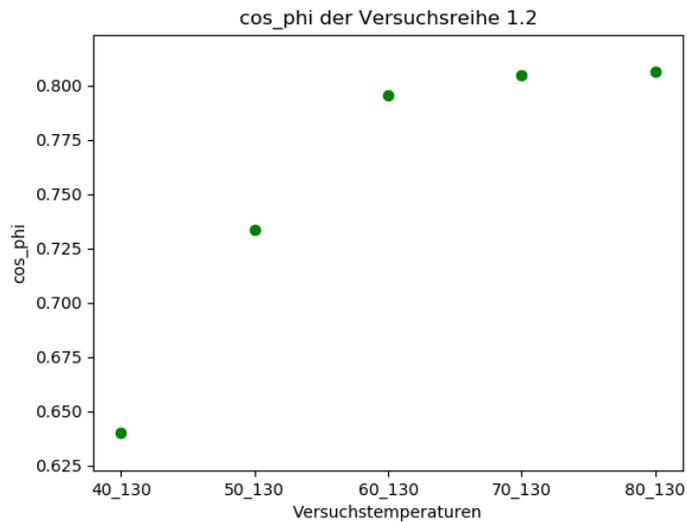


Abbildung 39: $\cos(\varphi)$ der Versuchsreihe 1.2

Für die Leistungsparameter der Versuchsreihe ergeben sich folgende gemittelte Werte:

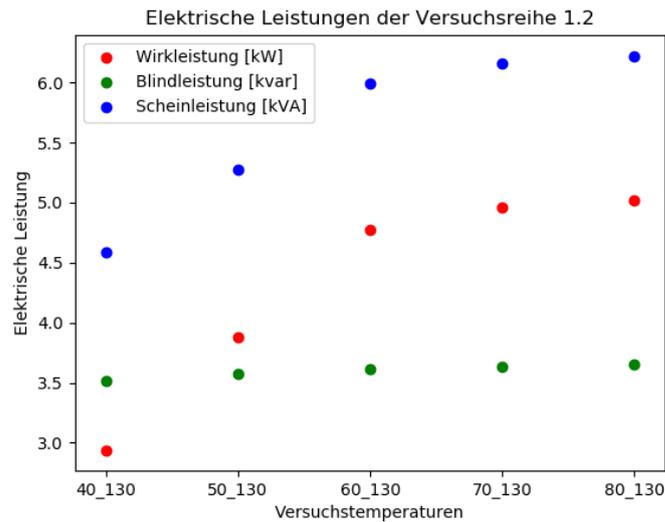


Abbildung 40: Elektrische Leistungsparameter der Versuchsreihe 1.2

6.1.3 Expansionsventil

Im Expansionsventil der HTWP wird das Kühlmittel entspannt, bevor ihm Wärme im Verdampfer zugeführt wird. Das Ventil kann die Zustände „geschlossen“ (0V), geöffnet (10V) oder alle Zustände dazwischen annehmen. Die Spannung gibt an, wie weit geöffnet das Expansionsventil ist. Folgende Tabelle gibt die gemittelten Werte der Versuchsreihe 1.1 wider:

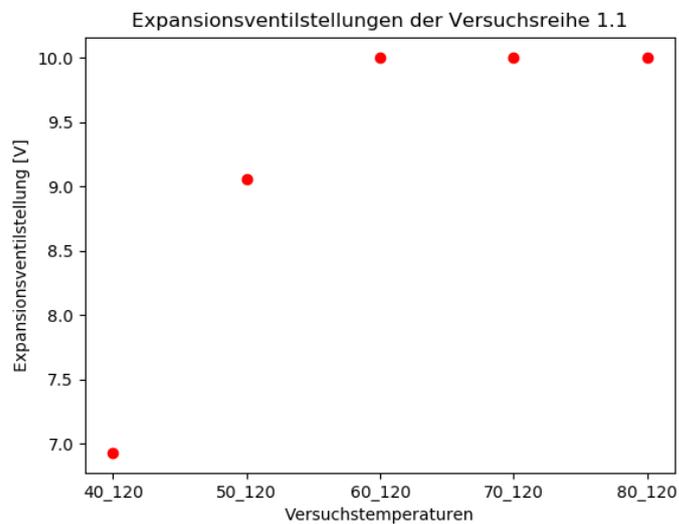


Abbildung 41: Expansionsventilstellungen der Versuchsreihe 1.1

Analog dazu wurden auch für die Versuchsreihe 1.2 die Expansionsventilstellungen gemittelt analysiert:

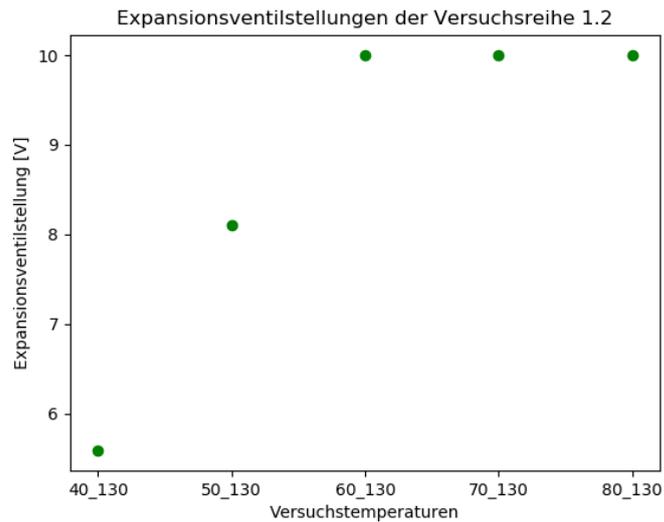


Abbildung 42: Expansionsventilstellungen der Versuchsreihe 1.2

6.1.4 COP

Die Effizienz eines Wärmepumpenprozesses lässt sich durch die Kennzahlen COP und Carnot-Leistungszahl beschreiben. Der COP gibt an, wie effizient die Wärmepumpe arbeitet, während die Leistungszahl nach Carnot den höchsten theoretisch möglichen COP angibt. Damit wird die maximal erreichbare Effizienz abgesteckt und eine Bewertung des COPs möglich. Abbildung 43 beschreibt den COP der verschiedenen Temperaturniveaus gegen den idealen Prozess mit der Carnot-Leistungszahl.

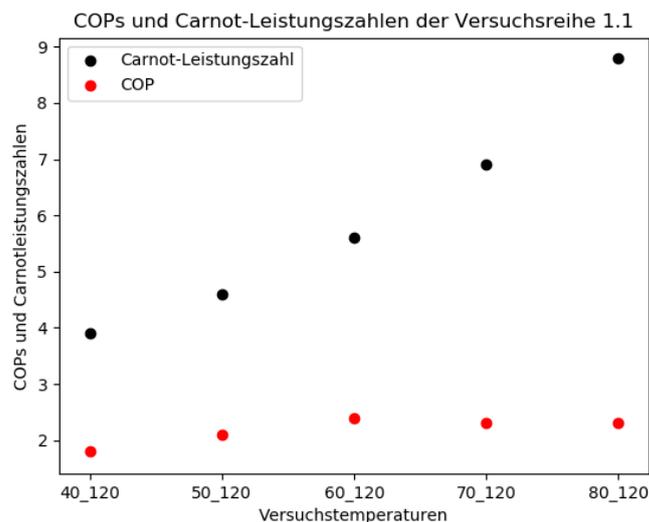


Abbildung 43: COPs und Carnot-Leistungszahlen der Versuchsreihe 1.1

Analog dazu beschreibt folgende Graphik die selben Größen für die Versuchsreihe 1.2:

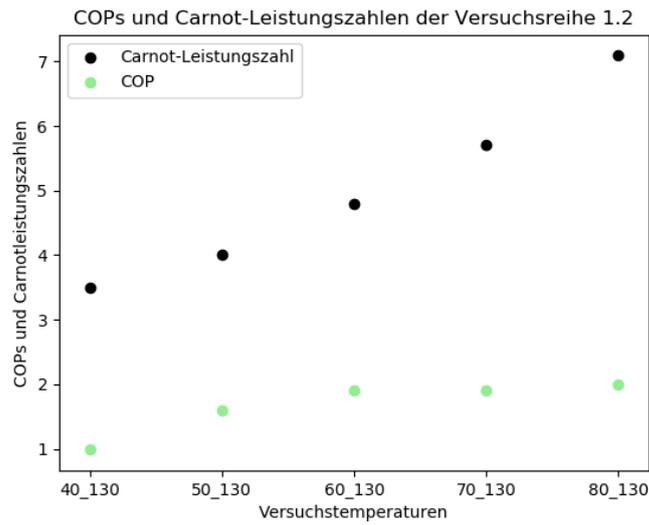


Abbildung 44: COPs und Carnot-Leistungszahlen der Versuchsreihe 1.2

Die numerischen Ergebnisse der Versuche werden in den folgenden beiden Tabellen zusammengefasst:

Versuch	COP	Carnot-Leistungszahl	Gütezahl
40_120	1,8	3,9	46%
50_120	2,1	4,6	45%
60_120	2,4	5,6	43%
70_120	2,3	6,9	34%
80_120	2,3	8,8	26%

Tabelle 12: Ergebnisse der Effizienzkennzahlen der Versuchsreihe 1.1

Versuch	COP	Carnot-Leistungszahl	Gütezahl
40_130	1,0	3,5	29%
50_130	1,6	4,0	38%
60_130	1,9	4,8	40%
70_130	1,9	5,7	34%
80_130	2,0	7,1	29%

Tabelle 13: Ergebnisse der Effizienzkennzahlen der Versuchsreihe 1.2

6.2 Ergebnisse Vergleich R365mfc und R245fa

Um zwei verschiedene Kältemittel in einer Anlage bei gleichen Bedingungen vergleichen zu können, wird eine Zielgröße benötigt. Diese ist der Gütegrad, wie in 2.1.6.4 beschrieben. Dieser beurteilt die Qualität des COPs hinsichtlich des maximal erreichbaren Wirkungsgrads, der über die Carnot-Leistungszahl bestimmt ist.

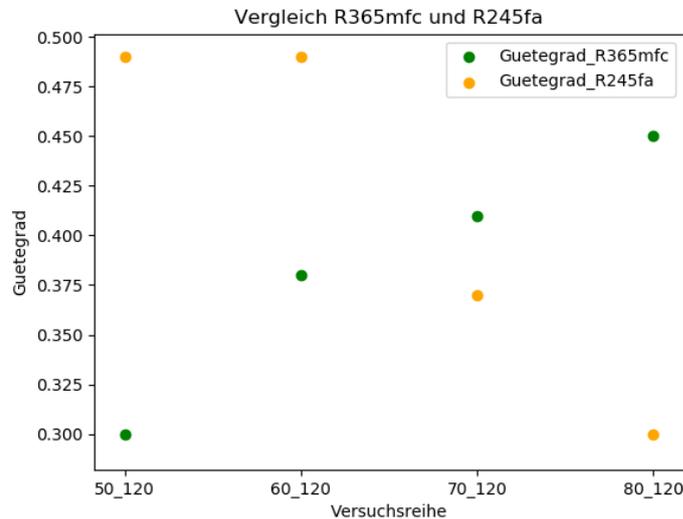


Abbildung 45: Vergleich der Gütegrade von R365mfc und R245fa

6.3 Ergebnisse der Simulation

In Folge der Versuchsdatenauswertung werden die Ergebnisse der Versuche in IPSEpro-Modelle verarbeitet. Diese stellen einen Vergleich zu den Versuchsdaten her und sollen deren Qualität beurteilen.

Von den Versuchen werden folgende Daten in die Simulation eingebracht:

- Wärmequellen- und Wärmesenkentemperatur
- Heissgastemperatur
- Kondensations- und Unterkühlungstemperatur
- Ergebnis Verdampfungstemperatur und Verdampfer Austrittstemperatur

Andere Faktoren werden durch die Simulation bei gegebenen Bedingungen errechnet. Folgende Zielgrößen wurden für die jeweiligen Versuche der Reihe 1.1 errechnet:

Versuch	Q _{zu} [kW]	Q _{ab} [kW]	P _{el} [kW]	COP
40_120	3,37	5,92	2,97	1,99
50_120	4,76	8,01	3,78	2,12
60_120	4,98	8,64	4,27	2,02
70_120	6,44	10,17	4,34	2,34
80_120	7,52	11,29	4,39	2,57

Tabelle 14: Simulationsergebnisse Versuchsreihe 1.1

Versuchsreihe 1.1 überspringt den Quelltemperaturbereich von 45°C, da die Versuchsdaten beschädigt wurden und nicht ausgewertet werden konnten.

Bei der Versuchsreihe 1.2 wurden wie in Tabelle 15 ersichtlich alle Temperaturschritte in der Simulation berücksichtigt.

Versuch	Q _{zu} [kW]	Q _{ab} [kW]	P _{el} [kW]	COP
40_130	2,87	5,36	2,90	1,85
45_130	3,30	6,23	3,43	1,82
50_130	3,84	7,16	3,87	1,85
60_130	4,87	8,97	4,79	1,87
70_130	6,03	10,26	4,93	2,08
80_130	6,67	10,97	5,02	2,19

Tabelle 15: Simulationsergebnisse Versuchsreihe 1.2

Diese Daten stammen aus IPSEpro und sind Werte einer statischen Simulation. Da die Versuchsdaten eingeschwungene Zustände zu gewissen Temperaturniveaus darstellen, werden die Durchschnittswerte der jeweiligen Versuche für die statische Simulation genutzt.

Nachdem die Daten der Versuche 1.1 und 1.2 in den Simulationen verarbeitet wurden, kann ein Vergleich zwischen Versuch und Modell angestellt werden. Die Daten der Versuche für den Vergleich werden die COPs der jeweiligen Versuche miteinander verglichen:

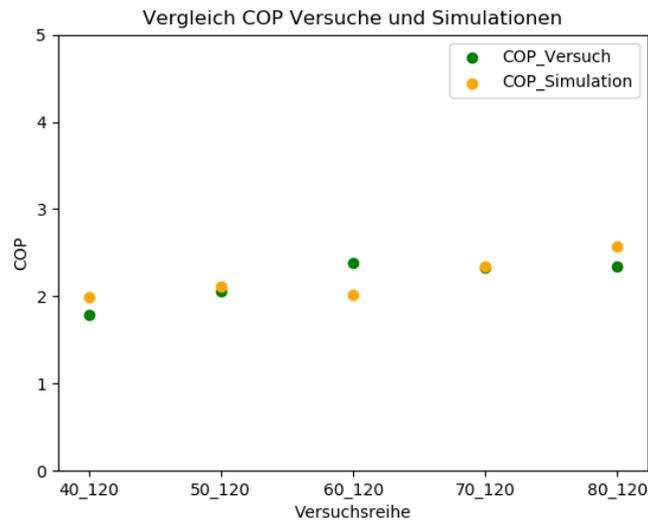


Abbildung 46: Vergleich COP Versuche und Simulationen 1.1

Wie in Abbildung 46 erkennbar, steigt der COP mit steigender Quelltemperatur und sinkendem Temperaturhub. Der Anstieg fällt jedoch sehr gering aus. Während bei der Simulation der COP von 1,99 bei 40°C Quelltemperatur zu 2,57 bei 80°C Quelltemperatur um 0,58 anstieg, wurde der COP in den Versuchen von 1,78 bei 40°C Quelltemperatur um 0,56 auf 2,34 bei 80°C Quelltemperatur angehoben.

Bei der Versuchsreihe 1.2 werden mit gleichem Verfahren die COPs der Versuche mit denen der Simulationen verglichen. Abbildung 47 zeigt die COPs der jeweiligen Temperaturniveaus mit steigender Quelltemperatur. Senktemperatur ist hier jeweils 130°C, anstatt wie bei Versuchsreihe 1.1 120°C. Der COP der Versuche steigt von 1,01 bei 40°C Quelltemperatur um 1,02 auf 2,03 bei 80°C Quelltemperatur. Bei der Simulation steigt der COP von 1,85 bei 40°C Quelltemperatur um 0,34 auf 2,19 bei 80°C Quelltemperatur.

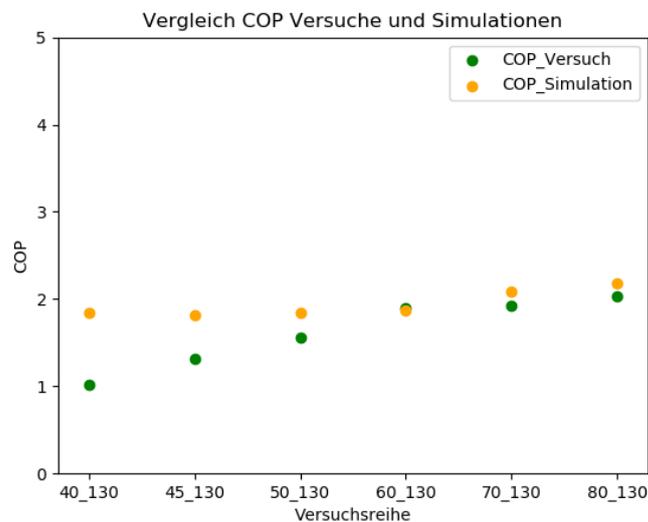


Abbildung 47: Vergleich COP Versuche und Simulationen 1.2

Der isentrope Wirkungsgrad für den Verdichter η_s gibt an, wie effizient der Verdichter arbeitet. Für die Versuchsreihe 1.1 ergeben sich folgende isentrope Wirkungsgrade:

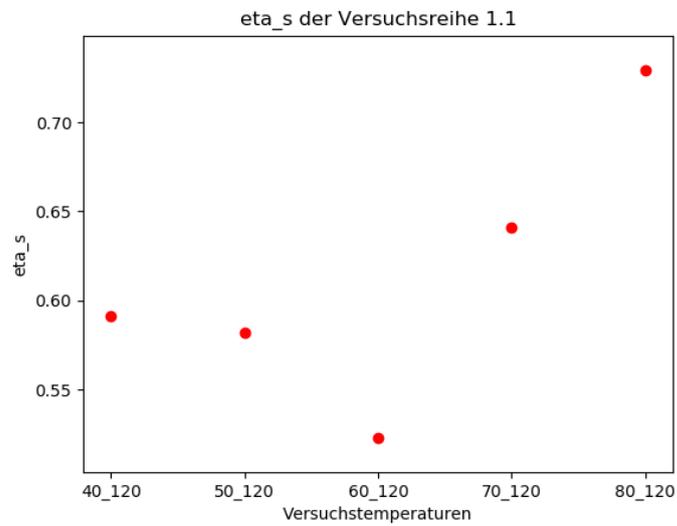


Abbildung 48: η_s der Versuchsreihe 1.1

Analog dazu ergeben sich für die Versuchsreihe 1.2 folgende isentrope Wirkungsgrade:

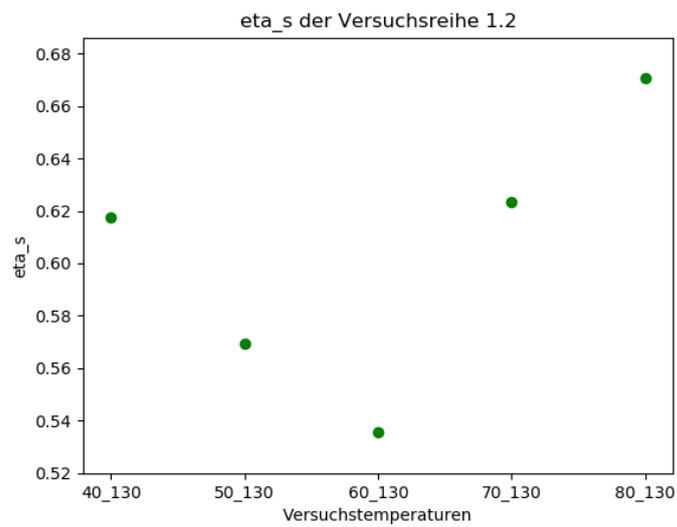


Abbildung 49: η_s der Versuchsreihe 1.2

7 Diskussion der Ergebnisse

7.1 Diskussion der Versuchsdurchführung

Die Versuchsanlage besteht aus einer Vielzahl von Komponenten. Alle müssen aufeinander abgestimmt sein, um aussagekräftige Ergebnisse liefern zu können. So wird etwa der Druck im Wärmesenkenbereich erhöht, um einer Dampfbildung entgegenzuwirken. Dies erhöht auch den Druck auf Schwachstellen, wie etwa Dichtungen oder Rohrverbindungen, die unter bestimmten Bedingungen undicht werden. Auf der Wärmequellenseite spielen vor allem hohe Vorlauftemperaturen über 70°C eine Rolle für Probleme bei Dichtungen. Durch ein vorsichtiges Prüfverhalten kann die Anlage ohne Gebrechen oder großen Flüssigkeitsverlust betrieben werden.

Vor der eigentlichen Versuchsdurchführung musste die Versuchsanlage auf Schäden und Fehler überprüft werden. Im Zuge einiger Testläufe wurde der alte, geschlossene Kühlkreis durch einen offenen Kühlkreis ersetzt. Durch die kürzere Rohrleitung des offenen Kühlers und die konstante Kühlwassertemperatur aus der Frischwasserleitung kann ein viel homogenerer Kühlvorgang hergestellt werden. Zudem wurde die Datenauswertung von den Messfühlern der Wärmepumpeneinheit überprüft. Das Auslesen von Daten über ein Netzkabel war schadhaft, sodass eine Schnittstelle für das Loggen der Daten auf eine Micro-SD Karte geschaffen werden musste.

7.2 Diskussion der Versuchsergebnisse

Wie in 5.1 dargestellt wurden die jeweiligen Sollwerte des Quellen- beziehungsweise Senkenkreis ($T4_{\text{soll}}$, $T16_{\text{soll}}$) als Zielparameter angestrebt. Es wurde versucht, diese möglichst genau und mit einer geringen Abweichung über die geforderte Zeitspanne zu halten. Wie Tabelle 16 entnommen werden kann, konnten die geforderten Maximalabweichungen in den wenigsten Fällen eingehalten werden. Auffällig ist, dass die maximale Messwertabweichung in den seltensten Fällen innerhalb des geforderten Bereichs liegt. Die maximale Abweichung vom arithmetischen Mittelwert liegt jedoch mit 2 Ausnahmen innerhalb des geforderten Bereichs.

Die Messwertabweichung auf der Wärmequellenseite werden primär durch den Heizstab verursacht. Dieser ist wie der gesamte Wärmequellenkreis nicht isoliert und muss teilweise sehr stark gegensteuern. So ergibt sich eine periodische Schwingung um den Sollwert mit einer relativ hohen Amplitude. Die Mittelwerte können aber sehr gut im erlaubten Bereich abgebildet werden. Auf der Wärmesenkenseite entscheidet das Mischventil über die Temperatur $T4$, die den Wert $T4_{\text{soll}}$ anzunehmen strebt. Da das ganze Mischventil über einen PID-Regler

gesteuert wird, lässt sich dieser in eingeschwungenen Zuständen für jede Senktemperatur einstellen. Auch hier kommt es zu relativ großen Schwankungen. Daraus resultieren Werte und arithmetische Mittelwerte, die größtenteils außerhalb des im Rahmen der Prüfnorm erlaubten Bereichs liegen.

7.2.1 Fehler und Messwertabweichungen

Messwerte sind grundsätzlich mit Fehlern behaftet. Um Ergebnisse einer Messung zu beurteilen ist es notwendig, über die Fehlerquellen der Messung zu sprechen. Ein Grundgesetz der Messtechnik besagt nicht ohne Grund: „Wer misst, misst Mist“.

Messfehler lassen sich in vier grundlegende Arten einteilen:

- Systematische Messfehler
- Zufällige Messfehler
- Grobe Messfehler
- Methodische Messfehler

Systematische Messfehler haben ihre Ursache in der Messschaltung, dem Messverfahren, den Eigenschaften des Referenzmesspunktes und den Eigenschaften der verwendeten Messkomponenten. Ein systematischer Fehler bringt unter gleichen Bedingungen reproduzierbare Ergebnisse. Er kann entweder technisch in der Schaltung oder bei der Signalverarbeitung berücksichtigt werden und ist somit korrigierbar.

Bei Messreihen können *zufällige Messfehler* auftreten und zeigen sich durch schwankende Messwerte. Die Ursache von zufälligen Messfehlern können statische Vorgänge in der Umgebung sein, oder wechselnde Messbedingungen, der Experimentator oder Rauschen. Diese Messfehler lassen sich durch statistische Methoden verringern.

Grobe Messfehler, oder „Ausreißer“ zeigen sich durch einzelne extreme Ereignisse in Messreihen. Diese können meistens nicht realen Ereignissen zugeordnet werden und werden meist durch externe Ereignisse ausgelöst. Diese Fehler kann man mit relativ kleinem Aufwand filtern.

Methodische Messfehler zählen zu den systematischen Messfehlern, haben aber eine zufällige Komponente. Diese Fehlerart tritt besonders in der Digitaltechnik auf. Die Beseitigung dieser Fehlerart lässt sich nur durch erheblichen Aufwand bewerkstelligen, da er sich zwar exakt definieren lässt, sein Auftreten aber zufällig ist. (Hering und Schönfelder, 2012)

Wie in Tabelle 6 dargestellt wird an die Wärmepumpenprüfung eine Anforderung hinsichtlich der zulässigen Sollwertabweichung gestellt. In Tabelle 16 werden für die Ergebnisse der Versuche ohne Rekuperation dargestellt. Dabei werden die beiden Zieltemperaturen jeder Messreihe mit dem Sollwert verglichen. Liegen diese Werte außerhalb des vorgegebenen Intervalls um den Sollwert, werden sie rot markiert, andernfalls grün. Ebenso finden sich die prozentuellen Abweichungen vom Sollwert.

Testreihe	Messpunkt	Maximale Messwertabweichung	Maximale Abweichung arithmetischer Mittelwert
40_120	T4	120,56	120,25
	T16	40,32	39,87
45_120	T4	121,48	120,07
	T16	44,44	44,93
50_120	T4	121,48	120,25
	T16	49,01	49,93
60_120	T4	118,81	119,68
	T16	59,61	60,05
70_120	T4	116,69	120,16
	T16	71,02	70,01
40_130	T4	130,54	129,64
	T16	40,43	39,98
45_130	T4	125,43	129,77
	T16	44,44	44,97
50_130	T4	126,42	130,01
	T16	49,49	49,96
60_130	T4	132,65	130,15
	T16	59,44	60,10
70_130	T4	132,96	130,23
	T16	69,34	70,04

Tabelle 16: Messwertabweichungen der Versuche

Bei der Auswertung der Daten wurden von jeder Temperaturstufe ein Zeitraum ausgewählt, der sich gut für eine Analyse eignet. Dies ist notwendig, da die Sollwerte, auf die hin geregelt wird (T4_soll, T16_soll) im Wärmequellen- beziehungsweise Wärmesenkenkreis liegen. Die Wärmepumpeneinheit kann nur zeitversetzt auf Änderungen in den beiden Kreisen reagieren. Wenn also diese beiden Kreise ihre gewünscht Solltemperatur erreicht haben, wird diese für die in 5.2.2 definierten Zeiträumen gehalten. In diesem Zeitraum werden die Systeme Quellenkreis und Senkenkreis als quasistationär angenommen. Nun gilt es, innerhalb dieses Zeitraums einen möglichst großen Zeitraum zu finden, in dem alle relevanten Parameter der Wärmepumpeneinheit quasistationär vorliegen. Dieser Bereich wird dann herausgenommen und für alle vorhandenen Messdaten analysiert. Damit kann ein quasistationärer Zustand für das jeweilige Temperaturniveau hergestellt werden und bewertet werden.

7.2.2 Elektrische Leistungsparameter

Die elektrischen Leistungsparameter geben Auskunft über die Effizienz des elektrischen Verbrauchers. In diesem Fall ist der elektrische Verbraucher der Elektromotor, der den Kolbenkompressor der Versuchswärmepumpe antreibt.

Bei einer induktiven Last, wie es hier der Fall ist, eilt der Strom der Spannung nach, da für Feldaufbau und Feldabbau der Spulen Zeit benötigt wird. Es kommt zu einer Phasenverschiebung φ . Der Wirkleistungsanteil sinkt, da Blindleistung auf- und abgebaut werden muss. Über den Zusammenhang in Abbildung 50 wird die Scheinleistung mit den anderen Größen in Bezug gestellt. Der Phasenverschiebungswinkel φ spannt sich zwischen Wirkleistung und Scheinleistung auf. (Bastian, Bumiller, Burgmaier, Eichler, Huber, Jaufmann, Manderla, Spielvogel, Tkotz und Winter, 2002)

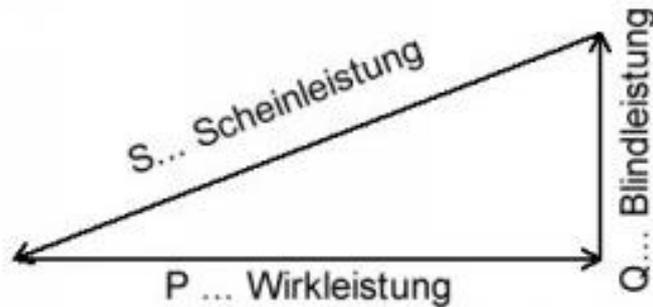


Abbildung 50: Beziehungen der Leistungsparameter für sinusförmige Leistungen im Einheitskreis (rieste, 2014)

Die Wirkleistung ist jene Leistung, die der Kompressor in Arbeit umsetzen kann. Scheinleistung ist die gesamte Leistung, die für den Betrieb zur Verfügung gestellt werden muss. Der Cosinus des Phasenverschiebungswinkel φ kann zwischen 0 und 1 liegen, und gibt an, wie viel Wirkleistungsanteil in der Scheinleistung enthalten ist. Bei $\cos(\varphi) = 0$ sind Strom und Spannung 90° Phasenverschoben. Hier wird keine Leistung in Wirkleistung umgesetzt.

Bei $\cos(\varphi) = 1$ sind Strom und Spannung in Phase und es wird die gesamte Leistung in Wirkleistung umgesetzt. (Bastian, Bumiller, Burgmaier, Eichler, Huber, Jaufmann, Manderla, Spielvogel, Tkotz und Winter, 2002)

Der Kompressor liegt aufgrund seiner induktiven Last dazwischen. Je effizienter der Kompressor arbeitet, desto höher wird der Wirkleistungsanteil und $\cos(\varphi)$ wird gegen 1 streben. Es kann also beurteilt werden, ob der Kompressor zu einem gewissen Zustand effizient oder ineffizient arbeitet.

Bei Versuchsreihe 1.1 lässt sich feststellen, dass der $\cos(\varphi)$ mit kleiner werdenden Temperaturhub gegen 1 strebt. Die Effizienz steigt also, je kleiner der Hub wird. Dies lässt sich am Verlauf der Leistungsparameter auch feststellen. Während der Wirkleistungsanteil steigt, bleibt die Blindleistung annähernd konstant über alle Temperaturstufen.

Das gleiche Verhalten lässt sich bei Versuchsreihe 1.2 beobachten. Auch hier strebt mit zunehmender Quelltemperatur der $\cos(\varphi)$ gegen 1 und der Verdichter arbeitet effizienter. Analog dazu lässt sich ein steigender Wirkleistungsanteil bei konstanter Blindleistung beobachten.

Verdichter ähnlicher Größe haben laut Vaillant einen Leistungsfaktor zwischen 0,75 und 0,9. (Vaillant, 2019)

7.2.3 Expansionsventil

Das Expansionsventil kann, wie in 6.1.3 beschrieben 3 Zustände annehmen. Komplette geöffnet, komplett geschlossen und einen Zustand dazwischen. Dieses wird als analoges Spannungssignal zwischen 0V (geschlossen) und 10V (geöffnet) ausgegeben. Bei der Versuchsanlage kommt ein elektronisch geregeltes Expansionsventil zum Einsatz. Dieses hat die Aufgabe auf Temperaturveränderungen vor dem Verdichter und Druckänderungen im Verdampfer zu reagieren. Steigt etwa die Temperatur vor dem Verdichter und sinkt der Verdampfungsdruck öffnet sich das Ventil und mehr Kältemittel wird durchgelassen. Wenn die Temperatur vor dem Verdichter absinkt oder der Druck im Verdampfer stark ansteigt, schließt sich das Expansionsventil weiter. (Dohmann, 2016)

In beiden Versuchsreihen lässt sich ein ähnliches Verhalten beobachten. Beide Versuche starten bei 40°C Quelltemperatur. In beiden Versuchen befindet sich das Ventil in einem halb geöffneten Zustand (< 7V). Ab 50°C Quelltemperatur öffnet sich das Ventil jedoch sprunghaft, bis es bei beiden Versuchen ab 60°C Quelltemperatur vollständig geöffnet ist (10V).

7.2.4 COP und Effizienz

Der COP ist die wichtigste Größe bei Effizienzbestimmungen einer Wärmepumpe. Um die Qualität des COPs zu bestimmen, ist es notwendig, die maximal erreichbare Effizienz zu bestimmen. Die Carnot-Leistungszahl gibt an, wie hoch der COP des idealen Prozesses wäre.

Bei beiden Versuchsreihen wurden die COPs mit sinkendem Temperaturhub größer.

Bei Versuchsreihe 1.1 betrug der COP für 80K Temperaturhub 1,8. Das entspricht einem Gütegrad von 46% bei dem maximal-möglichen COP von 3,9. Bei 40K Temperaturhub beträgt der COP 2,3. Das ist nur noch ein Gütegrad von 23% bei einem maximal möglichen COP von 8,8.

Die Versuchsreihe 1.2 beginnt mit einem COP von 1 bei 90K Temperaturhub. Das entspricht einem Gütegrad von 29% bei einem maximal möglichen COP von 3,5. Bei 50K Temperaturhub ergibt sich ein COP von 2, was ebenfalls einem Gütegrad von 29% entspricht bei einem idealen COP von 7,1.

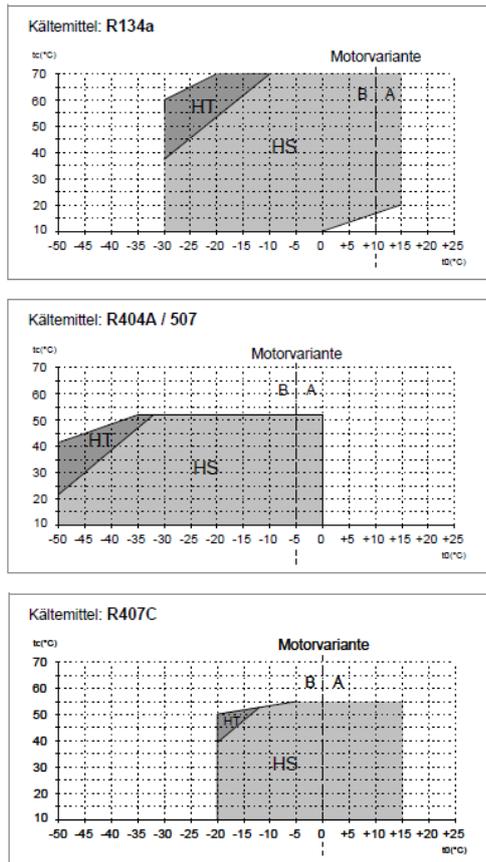
Die Carnot-Leistungszahl nimmt nur die Temperaturniveaus für die Bestimmung heran. Der reale Prozess ist verlustbehaftet. Wärmeverluste durch schlechte Isolierung sind ebenso ein großer Grund wie der Kompressor, der außerhalb seines Einsatzgebietes arbeitet. Der Temperaturhub von 20°C auf 120°C und 130°C ist mit diesem Kompressor sehr ineffizient. Bei diesem Temperaturhub spielen die Wärmeverluste eine untergeordnete Rolle. Bei kleiner

werdenden Temperaturhub arbeitet der Kompressor effizienter, aber Wärmeverluste nehmen zu und dämpfen so den Anstieg des COPs. Dieser steigt deshalb weniger stark mit der Vorlauf­temperatur als die Carnot-Leistungszahl.

7.2.5 Isentroper Wirkungsgrad Verdichter

Der Hersteller des Verdichters, die Firma *Goeldner* definiert den Einsatzbereich des Verdichters für ausgewählte Kältemittel:

4.1 Diagramme - Kältemittel



Erläuterungen zu den Diagrammen:

Der Betrieb der **GOELDNER-VERDICHTER** ist im Bereich der gezeigten Diagramme möglich.

Im helleren Bereich kann ohne Zusatzkühlung gefahren werden. Die linke Begrenzungslinie verschiebt sich j nach Sauggastemperatur.

An der Grenzlinie zwischen HS- und HT-Bereich ist die Verringerung der Sauggasüberhitzung oder Zusatzkühlung erforderlich, wenn die Verdichtungs­endtemperatur von 140°C überschritten wird.

Im dunkelgrauen Feld ist der Betrieb nur m HT-Verdichter möglich.

Als Zusatzkühlung können eingesetzt werden:

- Zusatzlüfter
- Wassergekühlte Zylinderköpfe
- Aufstellung im Verflüssigerluftstrom, Luftgeschwindigkeit >2,5m/sec.

In diesen Bereichen ist ein sauggasgekühlter HS-Verdichter einsetzbar

In diesen Bereichen ist grundsätzlich ein HT-Verdichter einzusetzen

t_c = Verflüssigungstemperatur
 t_0 = Verdampfungstemperatur
 Δt_{oh} = Sauggasüberhitzung

Abbildung 51: Verdichter Einsatzbereich (HKT-Goeldner, 2010)

Der Betrieb einer Hochtemperaturwärmepumpe befindet sich außerhalb dieser Parameter. In der Literatur werden typische isentrope Verdichterwirkungsgrade η_s zwischen 0,60 und 0,85 angesetzt. (Schiffmann und Favrat, 2010)

Die Verdichterwirkungsgrade der Versuchsreihe 1.1 mit $0,52 < \eta_s < 0,73$ liegen somit knapp unterhalb des typischen Bereichs laut Literatur. Auch bei der Versuchsreihe 1.2 mit $0,53 < \eta_s < 0,67$ liegen die Werte knapp unterhalb des üblichen Bereichs. Der Grund dafür ist, dass der Verdichter nicht für Hochtemperaturwärmepumpen ausgelegt ist und deshalb in diesem Einsatzgebiet ineffizienter arbeitet (Abbildung 51).

7.3 Diskussion Vergleich R365mfc mit R245fa

In Abbildung 45 lässt sich erkennen, dass die beiden Kältemittel R365mfc und R245fa unterschiedliche Eigenschaften zu unterschiedlichen Temperaturniveaus haben. Während R365mfc bei niedrigen Vorlauftemperaturen weniger effizient arbeitet, kann R245fa bei diesen niedrigeren Temperaturniveaus besser arbeiten und erreicht einen höheren Gütegrad. Mit steigender Quelltemperatur nimmt der Gütegrad von R245fa stark ab, während der Gütegrad von R365fa mit steigender Quelltemperatur ansteigt.

Arpagaus gibt, wie in Punkt 2.3 beschrieben, Einsatzbereiche (Temperaturen) für HTWP-Anwendungen der beiden Kältemittel an. R245fa hat ein Einsatzgebiet von 20°C bis etwa 140°C, während R365mfc von 45°C bis über 170°C eingesetzt werden kann. Wie in Abbildung 45 erkennbar, arbeitet bei den beiden niedrigsten Quelltemperaturen R245fa effizienter als R365mfc. R365mfc besitzt bei Raumtemperatur (20°C) einen Dampfdruck von lediglich 0,433 bar (Schulz, 2004), während R245mfc bereits 1,227 bar Dampfdruck bei Raumtemperatur aufweist (UMICO, 2019). Daher kann der Verdichter bei R24fa bereits bei niedrigeren Temperaturen mit höheren Dampfdrücken arbeiten.

7.4 Diskussion der Simulationsergebnisse

Es wäre zu erwarten, dass die Kurve der COPs über der Quelltemperatur monoton steigt. Das ist bei Versuchsreihe 1.1 nicht der Fall. Ausschlaggebend dafür sind Messungenauigkeiten. Diese beeinflussen die Versuchsdaten und in weiterer Folge auch die Simulationsdaten. Die Temperaturmessfühler am Verdampfer und Kondensator sind als Anlegefühler ausgeführt. Dabei wird ein Temperaturfühler mit einer Schlauchschelle an der Rohrwand angebracht. Um Wärmeverluste um den Temperaturmessfühler gering zu halten wird dieser, wie in Abbildung 52 ersichtlich, mit *Armaflex* isoliert.



Abbildung 52: Temperaturmessfühler unter Armaflex-Isolierung

Problematisch dabei ist, dass der Wärmeübergang des Kältemittels bis zum Temperaturfühler langsam und ineffizient funktioniert und mit einer Reihe von Fehlern behaftet ist. Der Messwert weicht daher vom realen Wert ab. Das erklärt auch die Abweichung des COPs vom erwarteten monoton steigenden Verhalten. Die COPs liegen so nah beieinander, dass selbst geringe Einflussfaktoren den Wert beeinträchtigen können.

Bei Versuchsreihe 1.2 bilden die COPs der Simulationen gut den realen Zustand ab. Hier kann jedoch bei niedrigeren Temperaturniveaus ($<50^{\circ}\text{C}$ Quelltemperatur) eine Abweichung der realen COPs von den simulierten festgestellt werden. Grund für die niedrigen COP-Werte bei großen Temperaturhuben ist der Wirkungsgrad des Verdichters. Dieser arbeitet bei dieser Temperaturlage extrem ineffizient und drückt dadurch den COP nach unten.

7.5 Abschließende Betrachtung

In der ersten Forschungsfrage wird die Technologie betrachtet. Es wird auf den Stand der Technik Bezug genommen und auf zukünftige Herausforderungen und Potentiale. In Kapitel 3 wird auf den Stand der Forschung eingegangen. Es wird die aktuelle Forschung und der immer größer werdende Markt für HTWP vorgestellt. Im Zuge dessen wird auch auf die potentiellen Einsatzgebiete eingegangen. Die Technologie ist bereits in der Lage in einigen Schlüsselindustrien (Lebensmittel-, Papier- und Chemieindustrie) effizient Prozesswärme zur Verfügung zu stellen. Schließlich wird auf den weiteren Forschungsbedarf eingegangen. Aus technischer Sicht besteht bei dem Kältemittel für den Hochtemperatureinsatz Forschungsbedarf. Hier müssen technische, ökologische und ökonomische Eigenschaften der Kältemittel an die sich laufend höher werdenden Standards angepasst werden. Für einen breiten Markt muss die

Wirtschaftlichkeit verbessert werden, um mit bereits etablierten Systemen am Markt mithalten zu können.

In der zweiten Forschungsfrage behandelt die Frage, ob das Kältemittel R245fa bei bestehenden Versuchsparametern Vorteile gegenüber dem Kältemittel R365mfc aufweist. Hier kann gezeigt werden, dass besonders bei niedrigen Verdampfungstemperaturen R245fa deutlich bessere Gütegrade erreicht als R365mfc.

In der letzten Forschungsfrage sollen die Versuchsergebnisse mit Ergebnissen aus dem Simulationsprogramm IPSEpro verglichen werden. Dafür werden die Daten der Versuche in HTWP-Modellen verarbeitet und die daraus resultierenden Simulationsergebnisse mit Versuchsdaten verglichen. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Simulations- und Versuchsergebnissen.

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Obwohl die Wärmepumpe als Technologie schon lange bekannt ist, konnte sie erst in den Jahren der Weltkriege unter Ressourcenknappheit zum Durchbruch gelangen. Eine Sonderform der Wärmepumpe, die Hochtemperaturwärmepumpe wird eine zunehmend wichtigere Rolle in der industriellen Verfahrens- und Energietechnik spielen. Sie vereint Flexibilität mit Effizienz und findet bereits heute in zahlreichen Anwendungen der Papier, Lebensmittel- und Chemieindustrie ihren Einsatz. Um neue mögliche Einsatzbereiche zu erschließen ist Forschung speziell beim Kältemittel notwendig. Immer strengere Verordnungen die Sicherheit und Umweltverträglichkeit betreffend stellen Kältemittel vor eine große Herausforderung. Hohe kritische Temperaturen, niedriger kritischer Druck, hohe Umweltverträglichkeit und gute Sicherheitseigenschaften sind die wichtigsten Anforderungen an zukünftige Kältemittel für Hochtemperaturwärmepumpen. Die EN 14511:2013 regelt Prüfverfahren für Wärmepumpen. Dabei sind Hochtemperaturwärmepumpen jedoch nicht mit eingeschlossen. Für diesen Wärmepumpentyp gibt es noch kein standardisiertes Prüfverfahren. Hier ist auch auf juristischer Ebene Handlungsbedarf.

Anhand der Versuchshochtemperaturwärmepumpe konnte gezeigt werden, wo die Stärken und Schwächen der Kältemittel R245fa und R365mfc im praktischen Versuch liegen. Weiters konnte für das Kältemittel R245fa eine Vielzahl von Versuchen durchgeführt werden. Diese reichen von einer Quelltemperatur von 40°C bis einer Senktemperatur von 130°C. Mit diesen Daten lässt sich die Effizienz dieser Hochtemperaturwärmepumpe für verschiedene Szenarien bestimmen. Die Daten der Versuche wurden mit Simulationsmodellen in IPSEpro verglichen. Analog zu diesen Versuchen wurden weitere Versuchsdaten mit der rekuperativen Sauggasüberhitzung aufgezeichnet. Diese sind jedoch nicht Gegenstand dieser Masterarbeit. Während des Betriebs mit dem Rekuperator kam es zu einer Reihe von Schwankungen im Temperaturverlauf. Diese lassen sich dadurch erklären, dass das Expansionsventil nicht schnell genug reagiert. Für zukünftige Forschungen wird daher vorgeschlagen, das modifizierte Regelprogramm für die HTWP zu verwenden. Dieses nutzt für den Betrieb mit dem Rekuperator einen modifizierten PID-Regler für das Expansionsventil. Weiterführende Forschung mit dem internen Wärmeübertrager kann einen Vergleich zwischen der Effizienz mit- und ohne rekuperativer Sauggasüberhitzung herstellen. Ein Erkenntnisgewinn für den Betrieb von Hochtemperaturwärmepumpen mit Kältemitteln, die ein überhängendes Zweiphasengebiet besitzen, kann erzielt werden und einen wichtigen Beitrag für die weitere Optimierung dieser Technologie darstellen.

Verzeichnisse

Literaturverzeichnis

Arpagaus, C. (2017) *Hochtemperatur Wärmepumpen, Literaturstudie zum Stand der Technik, der Forschung, des Anwendungspotenzials und der Kältemittel*.

Buchs. Verfügbar unter: https://www.fv-ies.ch/fileadmin/NTB_Institute/IES/FV-IES/Literaturstudie_Hochtemperatur_Waermepumpen.pdf

Arpagaus, C. (2019) *Hochtemperatur- Wärmepumpen für industrielle Anwendungen*. Zürich. Verfügbar unter: https://grosswaermepumpen-kongress.com/wp-content/uploads/2019/05/Cordin_Arpagaus.pdf

Arpagaus, C. (2019) *Hochtemperatur-Wärmepumpen*. Berlin: VDE Verlag GmbH.

Baehr, H. D. und Kabelac, S. (2012) *Thermodynamik*. 15. Aufl. Berlin: Springer-Verlag.

Bastian, P., Bumiller, H., Burgmaier, M., Eichler, W., Huber, F., Jaufmann, N., Manderla, J., Spielvogel, O., Tkotz, K. und Winter, U. (2002) *Fachkunde Elektrotechnik*. 23. Aufl. Wien: Verlags und Vertriebs Gesellschaft m. b. H.

Baumann, M., Egger, L., Holzmann, A., Kalt, G. und Pauritsch, G. (2016) *Energieszenario für Österreich*. Wien. Verfügbar unter: www.energyagency.at (Zugegriffen: 14. April 2021).

Bayer, H. und Walter, W. (1991) *Fluorierte Kohlenwasserstoffe*. Verfügbar unter: <https://www.chemie.de/lexikon/Fluorchlorkohlenwasserstoffe.html> (Zugegriffen: 11. Dezember 2019).

Biermayr, P., Dißbauer, C., Eberl, M., Enigl, M., Leonhartsberger, K., Maringer, F., Moidl, S., Schmidl, C., Strasser, C., Weiss, W., Wonisch, P. und Wopienka, E. (2020) „Innovative Energietechnologien in Österreich - Marktentwicklung 2019, Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie, Wärmepumpen und Windkraft“, *Berichte aus Energie- und Umweltforschung*, S. 1–266. Verfügbar unter: <http://www.downloadcenter.aee-intec.at/0uploads/dateien1013.pdf>.

Bogdanov, I. (2018) *Effizienzsteigerung in der Industrie durch Einsatz von Effizienztechnologien zur Sektorkopplung*. Graz. Verfügbar unter: https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2018/files/pr/Session_B6/PR_Bogdanov.pdf

Braune, A., Läufler, M., Duran, C. und Graaf, D. (2018) *Kältemittel-was Bauherren wissen müssen*. Dresden. Verfügbar unter: <https://frigoteam.com/wp-content/uploads/2018/10/K%C3%A4ltemittel-Was-der-Bauherr-wissen-sollte.pdf>

Bruno, L. (2007) *Keine Panik vor Thermodynamik*. 3. Aufl, *Journal of Chemical Information and Modeling*. 3. Aufl. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Bundesministerium für Umwelt, N. und nukleare S. (2021) *Glossar*. Verfügbar unter: <https://www.kaeltemittel-info.de/informationen/glossar/de/default/definition/odp/> (Zugegriffen: 2. März 2021).

Chemie.de (2012) *Absoluter Nullpunkt*. Verfügbar unter: https://www.chemie.de/lexikon/Absoluter_Nullpunkt.html (Zugegriffen: 22. Jänner 2020).

Chemie.de (2013) *Thermoelektrizität*. Verfügbar unter: <https://www.chemie.de/lexikon/Thermoelektrizität.html> (Zugegriffen: 10.

Dezember 2019).

Chemie.de (2016a) *Molare Masse*. Verfügbar unter: https://www.chemie.de/lexikon/Molare_Masse.html (Zugegriffen: 22. Jänner 2020).

Chemie.de (2016b) *Spezifische Wärmekapazität*. Verfügbar unter: https://www.chemie.de/lexikon/Spezifische_Waermekapazitaet.html (Zugegriffen: 23. Jänner 2020).

climalife (2014) *R-245fa*. Vincennes Cedex. Verfügbar unter: <https://de.climalife.dehon.com/r-245fa> (Zugegriffen: 11. Dezember 2019).

Cold.world (2018) *GWP von Kältemitteln*. Verfügbar unter: <https://cold.world/de/know-how/gwp-von-kaeltemitteln> (Zugegriffen: 11. Dezember 2019).

Deutsches Institut für Normung e. V. (2013) *DIN EN 14511*. Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung und -kühlung

dev-insider (2020) *Was ist OOP?* Verfügbar unter: <https://www.dev-insider.de/was-ist-oop-a-677737/> (Zugegriffen: 6. Oktober 2020).

Dohmann, J. (2016) *Thermodynamik der Kälteanlagen und Wärmepumpen*. 1. Aufl. Berlin: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-3-662-49110-2.

ecop (2020) *Rotationswärmepumpe K7*. Verfügbar unter: <https://www.ecop.at/de/produkt/#RotationHeatPumpK7> (Zugegriffen: 10. März 2020).

Eder, W. und Moser, F. (1979) *Die Wärmepumpe in der Verfahrenstechnik*. 1. Aufl. Wien: Springer.

eThermo (2021) *R365MFC Density | enthalpy entropy | saturation temperature | pressure | specific heat capacity | viscosity | thermal conductivity and so on - eThermo Thermodynamics & Transport Properties Calculation*. Verfügbar unter: <http://www.ethermo.us/ShowDetail58.htm> (Zugegriffen: 2. Februar 2021).

Genetron (2019) *245fa Safety Sheet*. Verfügbar unter: https://www.tega.de/fileadmin/Downloads_und_Bilder/kaeltemittel/H-FKW/Sicherheitsdatenblaetter_EN/SDS_R_245fa_EN_2019-03-12.pdf (Zugegriffen: 11. Dezember 2019).

Grundfos (2020) *MAGNA3 | Grundfos*. Verfügbar unter: <https://at.grundfos.com/products/find-product/magna3.html> (Zugegriffen: 18. August 2020).

Hering, E. und Schönfelder, G. (2012) *Sensoren in Wissenschaft und Technik*. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag. doi: 10.1007/978-3-8348-8635-4.

Herkert (2021) *Amortisation (Investitionsrechnung) - Fachlexikon Weiterbildung - AKADEMIE HERKERT*. Verfügbar unter: <https://www.akademie-herkert.de/glossar/amortisation-investitionsrechnung> (Zugegriffen: 1. März 2021).

HKT-Goeldner (2010) *Betriebsanleitung halbhermetische Kälteverdichter*. Hafling. Verfügbar unter: <https://www.hkt-goeldner.de/>

Jany, P. und Thieleke, G. (2011) *Thermodynamik für Ingenieure*. 10. Aufl. Wiesbaden: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-3-8348-9903-3.

Klein, S. (2009) „Hochtemperaturwärmepumpen: Aktuelle Situation und Perspektiven“, *KKA Kälte Klima Aktuell, Sonderdruck Grosskälte 2009*, S. 1–4. Verfügbar unter: www.kka-online.info.

Kleinertz, B., Faber, T. und Roon, S. Von (2019) *Vergleich und Bewertung*

verschiedener Speicherkonzepte für Nahwärmenetze der 4. Generation. Wien. Verfügbar unter: <https://www.ffegmbh.de/aktuelles/veroeffentlichungen-und-fachvortraege/823-vergleich-und-bewertung-verschiedener-speicherkonzepte-fuer-nahwaermenetze-der-4-generation>.

Kristen, Y. (2015) *Definitionen Thermodynamik*. Verfügbar unter: https://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/nawi.inst.251/Didactics/thermodynamik/INHALLT/DEF.HTM (Zugegriffen: 6. März 2020).

Kunde, J. (2018) *Die Wärmepumpe und ihre Geschichte - Ein Überblick | heizung.de*. Verfügbar unter: <https://heizung.de/waermepumpe/wissen/die-waermepumpe-und-ihre-geschichte-von-der-kaelte-zur-waerme/> (Zugegriffen: 3. Dezember 2019).

Lambers, K., Süß, J. und Köhler, J. (2007) „Der Verdichtungsprozess von Verdrängungsverdichtern“, *KI*.

LEIFIPhysik (2015) *Druck | LEIFIPhysik*. Verfügbar unter: <https://www.leifiphysik.de/mechanik/druck-kolben-und-schweredruck/grundwissen/druck> (Zugegriffen: 22. Jänner 2020).

Loeti (2012) *Was ist der Adsorptions-Prozess?* Verfügbar unter: <https://www.sbz-monteur.de/gut-zu-wissen/was-ist-der-adsorptions-prozess> (Zugegriffen: 10. Dezember 2019).

Lotz, H. (2015) *Geschichte der Kältemittel-gefährlich, umweltbelastend, aber damit innovationstreibend*. Stuttgart. Verfügbar unter: https://www.vhkk.org/page/vortrag/pdf/Geschichte_d.Kaeltemittel-Lotz.pdf

Ochsner, K. (2013) „Fernwärme : intelligent+erneuerbar“, *joule2*. in: talk: FFG Science Brunch 12/2013, Salzburg; 12-11-2013; in: "joule2 Fernwärme: intelligent + erneuerbar", Klima- und Energiefonds, (2013)

Oliver, J. (2007) *Energietechnik*. 6. Aufl, *Journal of Chemical Information and Modeling*. 6. Aufl. Wiesbaden: Teubner Verlag. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Paschotta, R. (2017) *RP-Energie-Lexikon - Absorptionswärmepumpe, Absorptionskältemaschine, Energieeffizienz, Heizzahl, Vergleich, Kompressionswärmepumpe, Anwendungen*. Verfügbar unter: <https://www.energie-lexikon.info/absorptionswaermepumpe.html> (Zugegriffen: 9. Dezember 2019).

Paschotta, R. (2018a) *Adsorptionswärmepumpe, Adsorptionskältemaschine, Sorptionsmittel, Zeolith, Wasser, Kältemittel, Funktionsprinzip, Energieeffizienz*. Verfügbar unter: <https://www.energie-lexikon.info/adsorptionswaermepumpe.html> (Zugegriffen: 9. Dezember 2019).

Paschotta, R. (2018b) *RP-Energie-Lexikon - Kompressionswärmepumpe, Kreislauf-Prinzip, Kältemittel, Antrieb, Elektromotor, Gasmotor*. Verfügbar unter: <https://www.energie-lexikon.info/kompressionswaermepumpe.html> (Zugegriffen: 4. Dezember 2019).

Pröll, T. und Wolf, M. (2019) „Effizienzsteigerung von Hochtemperaturwärmepumpen“, *KI*. Verfügbar unter: www.ki-portal.de (Zugegriffen: 11. Dezember 2019).

python.org (2020) *What is Python? Executive Summary | Python.org*. Verfügbar unter: <https://www.python.org/doc/essays/blurbl/> (Zugegriffen: 6. Oktober 2020).

rieste (2014) *Hallenstrahler HQI mit geringem Blindstromanteil - RIESTE Licht*. Verfügbar unter: <https://www.rieste.com/hallenstrahler-hqi-mit-wenig->

blindstrom-anteil/ (Zugegriffen: 15. März 2021).

RN-Wissen (2014) *Regelungstechnik – RN-Wissen.de*. Verfügbar unter: <https://rn-wissen.de/wiki/index.php/Regelungstechnik#PID-Regler> (Zugegriffen: 20. August 2020).

Röhr, C. (2016) *4. Zeolithe (Technische Tectosilicate)*. Freiburg. Verfügbar unter: <https://docplayer.org/41299072-4-zeolithe-technische-tectosilicate.html>.

Rosenkranz, A. (2018) *Hochtemperatur-Wärmepumpe: Funktion und Einsatz*. Verfügbar unter: <https://heizung.de/waermepumpe/wissen/hochtemperatur-waermepumpe-funktion-und-einsatz/> (Zugegriffen: 14. Dezember 2019).

Rosenkranz, A. (2019) *Die Absorptionswärmepumpe heizt mit Gas*. Verfügbar unter: <https://heizung.de/waermepumpe/wissen/die-absorptionswaermepumpe-heizt-mit-gas/> (Zugegriffen: 9. Dezember 2019).

Schaefer, H. (1994) *Energietechnik*. 1. Aufl. Berlin: Springer-Verlag.

Schiffmann, J. und Favrat, D. (2010) „Design, experimental investigation and multi-objective optimization of a small-scale radial compressor for heat pump applications“, *Energy*, 35, S. 436–450.

Schulz, A. (2004) „Mikrostrukturierte Wärmetauscherrohre“, *KI*. Verfügbar unter: https://www.ki-portal.de/wp-content/uploads/featured_image/4cf3242d44e.pdf

SimTech (2018) *IPSEpro*. Verfügbar unter: <http://simtechnology.com/CMS/index.php/ipsepro> (Zugegriffen: 24. August 2020).

TA (2020) *Winsol – TA Wiki*. Verfügbar unter: <https://wiki.ta.co.at/Winsol> (Zugegriffen: 2. November 2020).

Techniklexikon (2019) *Brüden - Techniklexikon*. Verfügbar unter: <http://www.techniklexikon.net/d/brueden/brueden.htm> (Zugegriffen: 9. Dezember 2019).

TU-Graz (2019) *Wärmepumpe | AustriaWiki im Austria-Forum*. Verfügbar unter: <https://austria-forum.org/af/AustriaWiki/Waermepumpe> (Zugegriffen: 3. Dezember 2019).

UMICO (2019) *Sicherheitsdatenblatt R245fa gemäß 1907/2006/EG*. Würzburg.

Vaillant (2019) *Planungsinformation Wärmepumpen*. Remscheid. Verfügbar unter: <https://www.vaillant.ch/downloads/planungsinformationen/planungsinformation-waermepumpen-1636328.pdf> (Zugegriffen: 11. Dezember 2019).

Veitengruber, F. (2020) *Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH*. Verfügbar unter: <https://www.ffegmbh.de/kompetenzen/energiekonzepte/877-info-was-ist-eine-pinch-analyse> (Zugegriffen: 19. März 2020).

Verein deutscher Ingenieure e. V. (2019) *VDI 4650:2019*. VDI-Verlag.

Wilk, V., Windholz, B., Hartl, M., Fleckl, T., Fluch, J., Grubbauer, A., Brunner, C., Lange, D., Wertz, D. und Ponweiser, K. (2017) *EnPro-Erneuerbare Prozesswärme PLANUNGSLEITFADEN Integration von Solarthermie und Wärmepumpen in industrielle Prozesse Erstellt im Auftrag des Klima-und Energiefonds*. Wien. Verfügbar unter: www.aee-intec.at (Zugegriffen: 25. Februar 2021).

Wolf, M., Hoffmann, J., Saxinger, M. und Pröll, T. (2018) *Vienna Green CO 2 Performance determination of a high temperature heat pump system, Zwischenbericht, Universität für Bodenkultur Wien*.

Wolf, M. (2017) *Application Potential and Optimization of High Temperature Heat Pump Systems for Process Heat Supply, Dissertation, Universität für Bodenkultur Wien*.

Zahoransky, R. A. (2007) *Energietechnik*. 3. Aufl. Wiesbaden: Vieweg Verlag.
Zogg, M. (2008) *Geschichte der Wärmepumpe: Schweizer Beiträge und internationale Meilensteine*. Oberburg. Verfügbar unter: <http://www.zogg-engineering.ch/publi/GeschichteWP.pdf>.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Marktentwicklung der Wärmepumpe in Österreich (Biermayr, Dißauer, Eberl, Enigl, Leonhartsberger, Maringer, Moidl, Schmidl, Strasser, Weiss, Wonisch und Wopienka, 2020).....	10
Abbildung 2: Endenergieverbrauch der österreichischen Industrie 2030 (Baumann, Egger, Holzmann, Kalt und Pauritsch, 2016)	11
Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Druckgrößen (Jany und Thieleke, 2011)	15
Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Temperaturgrößen (Jany und Thieleke, 2011)	15
Abbildung 5: p,v-Diagramm mit Parameterlinien (Jany und Thieleke, 2011)	16
Abbildung 6: Schema rechts- und linkslaufender thermodynamischer Prozesse (Jany und Thieleke, 2011)	21
Abbildung 7: Ideales T,s - Diagramm des Wärmepumpenprozesses (Zahoransky, 2007)	23
Abbildung 8: Reales T,s - Diagramm des Wärmepumpenprozesses (Eder und Moser, 1979)	24
Abbildung 9: Schematische Darstellung einer Wärmepumpe mit Rekuperator (Wolf, 2019) .	24
Abbildung 10: Darstellung einer rekuperativen Sauggasüberhitzung (Pröll und Wolf, 2019) .	25
Abbildung 11: Systematik der Wärmepumpen (Eder und Moser, 1979).....	26
Abbildung 12: Schema einer einstufigen Kompressionswärmepumpe (Eder und Moser, 1979)	27
Abbildung 13: Schema einer Zweistufige Kompressionswärmepumpe (Eder und Moser, 1979)	27
Abbildung 14: Absorptionswärmepumpe mit inneren Wärmetauscher (Eder und Moser, 1979)	28
Abbildung 15: Desorptions- und Adsorptionsphase einer Adsorptionswärmepumpe (Loeti, 2012).....	29
Abbildung 16: Verdampfer mit Thermokompressor (Eder und Moser, 1979)	30
Abbildung 17: Dampfstrahlverdichter in einem Verdampfungs- und Destillationsprozess (Eder und Moser, 1979)	30
Abbildung 18: Thermische Wärmepumpe (Eder und Moser, 1979)	31
Abbildung 19: Peltierelement einer Peltierwärmepumpe (Eder und Moser, 1979)	32
Abbildung 20: Rotationswärmepumpe (Eder und Moser, 1979).....	32
Abbildung 21: Zweistufige Hochtemperaturwärmepumpe (Schaefer, 1994).....	33
Abbildung 22: Einsatzbereich von verschiedenen Kältemitteln für HTWP-Anwendungen (Cordingeneric Arpagaus, 2019).....	34
Abbildung 23: p-h-Diagramm für R245fa (Arpagaus, 2017)	36
Abbildung 24: p-h-Diagramm für R365mfc (Arpagaus, 2017)	37
Abbildung 25: COPs führender Forschungsanlagen (Cordin Arpagaus, 2019)	38
Abbildung 26: Marktübersicht wichtiger Hochtemperaturwärmepumpen (Cordin Arpagaus, 2019).....	39

Abbildung 27: Entwicklung des COP von Kleinwärmepumpen am Markt (Cordin Arpagaus, 2019).....	40
Abbildung 28: COP ausgewählter industrieller Hochtemperaturwärmepumpen abhängig vom Hub (Cordin Arpagaus, 2019).....	40
Abbildung 29: Technisches Potential von HTWP in Europa 2012 (Cordingeneric Arpagaus, 2019).....	41
Abbildung 30: Schematische Darstellung des Speicherkonzepts eines solarthermischen Speichers mit einer Hochtemperaturwärmepumpe (Kleinertz, Faber und Roon, 2019).....	43
Abbildung 31: Anzahl der Publikationen mit HTWP-Kontext in Relation zum Rohölpreis (Cordingeneric Arpagaus, 2019).....	45
Abbildung 32: Schematischer Aufbau Versuchswärmepumpe (Wolf, Hoffmann, Saxinger und Pröll, 2018).....	49
Abbildung 33: Heizstab mit Temperatursensoren T15 und T16	50
Abbildung 34: Isolierte Darstellung des Wärmesenkenkreis	50
Abbildung 35: Datenbearbeitungsprozess	54
Abbildung 36: IPSEpro-Modelle.....	55
Abbildung 37: $\cos(\varphi)$ der Versuchsreihe 1.1.....	59
Abbildung 38: Elektrische Leistungsparameter der Versuchsreihe 1.1	60
Abbildung 39: $\cos(\varphi)$ der Versuchsreihe 1.2.....	60
Abbildung 40: Elektrische Leistungsparameter der Versuchsreihe 1.2	61
Abbildung 41: Expansionsventilstellungen der Versuchsreihe 1.1	61
Abbildung 42: Expansionsventilstellungen der Versuchsreihe 1.2	62
Abbildung 43: COPs und Carnot-Leistungszahlen der Versuchsreihe 1.1	62
Abbildung 44: COPs und Carnot-Leistungszahlen der Versuchsreihe 1.2	63
Abbildung 45: Vergleich der Gütegrade von R365mfc und R245fa	64
Abbildung 46: Vergleich COP Versuche und Simulationen 1.1	66
Abbildung 47: Vergleich COP Versuche und Simulationen 1.2.....	66
Abbildung 48: η_s der Versuchsreihe 1.1.....	67
Abbildung 49: η_s der Versuchsreihe 1.2.....	67
Abbildung 50: Beziehungen der Leistungsparameter für sinusförmige Leistungen im Einheitskreis (rieste, 2014).....	71
Abbildung 51: Verdichter Einsatzbereich (HKT-Goeldner, 2010)	73
Abbildung 52: Temperaturmessfühler unter Armaflex-Isolierung	75

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arten thermodynamischer Systeme (Jany und Thieleke, 2011)	13
Tabelle 2: Eigenschaften Kältemittel R245fa (Genetron, 2019)(climalife, 2014)	35
Tabelle 3: Eigenschaften Kältemittel R365mfc (eThermo, 2021)	36
Tabelle 4: Versuchsreihen 1.1 und 1.2	51
Tabelle 5: Prüfbedingungen für Wasser/Wasser Wärmepumpen nach EN 14511 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2013).....	52
Tabelle 6: Zulässige Abweichung von den Einstellwerten (Deutsches Institut für Normung e. V., 2013)	53
Tabelle 7: Grenzwerte für Messunsicherheiten (Deutsches Institut für Normung e. V., 2013)	53
Tabelle 8: Datenreihen am Hauptpanel	56
Tabelle 9: Datenreihen der Hochtemperaturwärmepumpe	58
Tabelle 10: Messergebnisse der Versuchsreihe 1.1	58
Tabelle 11: Messergebnisse der Versuchsreihe 1.2	58
Tabelle 12: Ergebnisse der Effizienzkennzahlen der Versuchsreihe 1.1	63
Tabelle 13: Ergebnisse der Effizienzkennzahlen der Versuchsreihe 1.2	63
Tabelle 14: Simulationsergebnisse Versuchsreihe 1.1	65
Tabelle 15: Simulationsergebnisse Versuchsreihe 1.2	65
Tabelle 16: Messwertabweichungen der Versuche.....	70

Abkürzungsverzeichnis

Symbol lateinisch	Einheit	Erklärung
A	m ²	Fläche
C	Celsius	Celsius
c	m/s	Geschwindigkeit
c _p	$\frac{J}{g * K}$	Spezifische Wärmekapazität
E	J	Energiebilanz
E _{kin}	J	Kinetische Energie
E _{pot}	J	Potentielle Energie
F	N	Kraft
g	$\frac{m}{s^2}$	Erdbeschleunigung
h	m	Höhe
H	$\frac{kJ}{kg}$	Enthalpie
J	J	Joule
K	K	Kelvin
m	kg	Masse
M	$\frac{g}{mol}$	Molmasse
n	mol	Stoffmenge
p	$\frac{N}{m^2}$	Druck
P	W	Leistung
Pa	Pa	Pascal
p _{abs}	$\frac{N}{m^2}$	Absoluter Druck
p _{amb}	$\frac{N}{m^2}$	Atmosphärischer Luftdruck der Erde
p _e	$\frac{N}{m^2}$	Positiver Überdruck
P _{el}	W	Elektrische Leistung
p _{rel}	$\frac{N}{m^2}$	Relativdruck

Q	J	Wärme
Q _{ab}	J	Abgegebene Heizleistung
S	$\frac{J}{g \cdot K}$	Entropie
T	K	Temperatur
t ₀	K	Schmelzpunkt des Wassers
T _{ab}	K	Temperaturabgabe
T _{zu}	K	Temperaturaufnahme
U	J	Innere Energie
V	m ³	Volumen
v	m ³	Spezifisches Volumen
VA	VA	Volt Ampere
var	var	Volt Ampere reaktiv
Vm	m ³	Stoffmengenbezogenes Volumen
W	J	Arbeit
W	W	Watt
W _v	J	Volumsänderungsarbeit
x	-	Dampfgehalt

Symbol griechisch	Einheit	Erklärung
β	-	Jahresarbeitszahl
ζ	-	Exergetischer Wirkungsgrad
η _c	-	Carnot Faktor
η _s	-	Isentroper Wirkungsgrad
ϑ	K	Empirische Temperatur
ε _C	-	Leistungszahl nach Carnot

Abkürzung	Einheit	Erklärung
COP	-	Coefficient of Performance
$\cos(\varphi)$	-	Wirkleistungsfaktor
csv	-	Comma Seperated Value
EN	-	Europäische Norm
FCKW	-	Fluorchlorkohlenwasserstoff
GWP	-	Global Warming Potential
HFCKW	-	Teilfluorierte Kohlenwasserstoffe
HTWP	-	Hochtemperaturwärmepumpe
MDK	-	Model Development Kit
PSE	-	Process Simulation Environment
SI	-	Internationale Einheiten (Système international d'unités)