

Abschlussarbeit

über

**Kopplung von Energiesektoren: Elektrische Wärmepumpe, Heizung und
Nachtspeicher**

Autor: Bryan Velez Florez

Matrikelnummer: 11100756

Erstprüfer: Prof. Dr. Eberhard Waffenschmidt

Zweitprüfer: Prof. Dr. Beate Rhein

Anfertigungszeitraum: 17.12.2015 - 31.05.2016

Abgabetermin: 03.06.2016

Eidesstattliche Erklärung:

Name: Bryan Velez Florez

Matrikelnummer: 11100756

Abschlussarbeit: Kopplung von Energiesektoren: Elektrische Wärmepumpe,
Heizung und Nachtspeicher

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorgelegte Abschlussarbeit selbständig und ohne andere außer denen von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe.

Ort, Datum, Unterschrift: _____

Sperrvermerk:

Hiermit erkläre ich, dass meine Abschlussarbeit für wissenschaftliche Verwendung ausgeliehen werden darf. Außerdem stimme ich der Veröffentlichung meiner Arbeit im Internet durch meinen Betreuer zu.

Ort, Datum, Unterschrift: _____

Bildrechte:

Hiermit erkläre ich, dass ich alle verwendete Bilder, Tabellen und Diagramme in der Abschlussarbeit selbstständig angefertigt habe.

Außer Abb. 2, die aus der Wikimedia übernommen wurde.

Ort, Datum, Unterschrift: _____

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Simulation von drei Koppelstellen unter idealen Bedingungen durchzuführen. Diese Koppelstellen gehören zu den Kopplungen von Energiesektoren. Die für die Simulation bedeutendste Energiekopplung ist die sogenannte Power-to-Heat, die auf der Umwandlung von Elektrizität in Wärme basiert. Die zu betrachtenden Koppelstellen bilden die elektrische Wärmepumpe, die elektrische Heizung und den Nachtspeicherofen. Der Wärmebedarf eines Einfamilienhauses ist einer der bedeutendsten Eingangsparameter für die Modellierung und Darstellung der Koppelstellen. Er ermöglicht insbesondere die Ermittlung der wichtigsten Ausgangsparameter. Dazu gehören die Betriebskosten, der Energieaufwand und die CO₂-Emissionen.

Abstract

The aim of this project is to simulate the functioning of three coupling stations. These are heating systems based in a ideal operation. These energy systems belong to -The Combining of the Energy Sectors, specifically into the combining of Power-to-heat, based on transformation of electricity to warmth. Those systems are an electric heat pump, a heater and a night storage heater. In order to do this, the different type of parameters of a one-family household and its corresponding power and energy requirements for heating will be needed to calculate the more important outputs. These include economic costs, energy load and CO₂-emissions.

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
bzw.	Beziehungsweise
C _x H _y	Aromate
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
COP	Coefficient of Performance
dB	Dezibel
d.h.	Das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
EnEV	Energieeinsparverordnung
etc.	et cetera
ggf.	gegebenfalls
GWP	Treibhauspotential
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JAZ	Jahresarbeitszahl
Kap.	Kapitel
KM	Kältemittel
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kälte-Wärme-Kopplung
lt.	Laut
NH ₃	Ammoniak
NO _x	Stickoxid
R134a	Kältemittel Tetrafluorethan

R22	Kältemittel Chlordifluormethan
SI	Internationales Einheitensystem
SO ₂	Schwefeldioxid
Tab.	Tabelle
usw.	und so weiter
WP	Wärmepumpe
z.B.	zum Beispiel

Inhaltverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Stand der Technik	2
3. Kopplung von Energiesektoren	3
4. Wärmebedarf	7
5. Elektrische Wärmepumpe	14
5.1. Prinzip und Einteilung einer Wärmepumpe.....	14
5.1.1. Das Arbeitsprinzip.....	14
5.1.2. Einteilung einer Wärmepumpe.....	15
5.2. Wärmepumpenarten.....	17
5.2.1. Wärmequellen.....	17
5.2.2. Arte von Wärmepumpen.....	18
5.2.2.1. Luft/Luft –Wärmepumpe.....	18
5.2.2.2. Luf/Wasser –Wärmepumpe.....	19
5.2.2.3. Wasser/Wasser –Wärmepumpe	20
5.2.2.4. Sole/Wasser –Wärmepumpe.....	21
5.3. Bauteile einer Wärmepumpe.....	23
5.3.1. Wärmetauscher.....	23
5.3.1.1. Der Kondensator.....	24
5.3.1.2. Der Verflüssiger.....	24
5.3.2. Kompressor.....	24
5.3.3. Drosselventil.....	25
5.3.4. Kältemittel.....	25
5.3.5. Schallschutzmassnahme.....	27
5.4. Funktionsweise einer Kompressionswärmepumpe.....	27
5.5. Berechnung der Parameter eines Wärmepumpensystems.....	30
5.5.1. Energie- und Massenbilanz.....	30
5.5.2. Mollier-Diagramm.....	35
5.5.3. Carnotscher Kreisprozess.....	39



5.6. Kennzahlen.....	41
5.6.1. COP-Wert	41
5.6.2. Wirkungsgrad.....	43
5.6.3. Jahresarbeitszahl	44
6. Elektrisches Heizen.....	45
6.1. Wärmeübertragung.....	45
6.2. Prinzip der elektrischen Heizung.....	47
6.3. Bauteile und Arten von elektrischen Heizungen.....	47
7. Nachtspeicher.....	49
7.1. Prinzip und Funktionsweise eines Nachtspeichers.....	49
7.2. Bauteile einer Speicherheizung.....	51
8. Kosten.....	52
9. Schadensermittlung von Emissionen.....	57
10. Simulation und Ergebnisse.....	60
11. Fazit.....	86
12. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	87
13. Nomenklatur- und Formelzeichen.....	91
14. Literaturverzeichnis.....	97
15. Anhang.....	99

1. Einleitung

Der Bedarf von Energieumwandlung stellt sich immer für uns zu Verfügung und lässt sich durch die Kopplung von Energiesektoren abdecken. Die Wärme und die Elektrizität spielen eine sehr wichtige Rolle für die Energieumwandlung in der Heiztechnik. Die Verknüpfung der Energiesektoren ist zwingend notwendig für die korrekte Einteilung der einzelnen spezifischen Gruppen der Energiebedürfnisse. Dies trägt zu Kostenoptimierungen, Emissionsverringerungen und Steigerung der Qualität und des Komforts bei. Da die Kopplung von Strom und Wärme am günstigsten ist, ist der Einsatz des Power-to-Heat-Bereiches am verbreitetsten. Im grösstenteils im gesamten Europa ist es notwendig, in den Wintermonaten Gebäude zu beheizen. Dabei schrenkt sich diese Heizperiode, je nach den Wetterbedingungen und Jahreszeit ein. Unter Umständen muss man sogar das ganze Jahr auf die Heiztechnik zurückgreifen, da es immer einen Bedarf an warmem Wasser besteht. Die Warmwasserbereitung ist wiederum ein Beispiel für eine elektrothermische Koppelstelle der Energiesektoren. Die Koppelstellen, die in dieser Arbeit betrachtet werden, sind für die Heiztechnik von Bedeutung. Man spricht von Elektrowärmepumpen, Elektroheizungen und Nachtspeicheröfen. Diese Koppelstellen sind für die Raumheizung und Warmwasserbereitung zu benutzen. Es wird einen Aktuellen Stand über die Wärmepumpetechnik, elektrische -Heizung und Speicher vermittelt. Darüber hinaus werden die Systeme im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit, Qualität und Umweltverträglichkeit verglichen. Für die Ermittlung der dementsprechenden Faktoren wird eine Simulation mit dem Software Matlab® durchgeführt. Diese berechnet für jede Koppelstelle die mögliche Kosten, Emissionen und Energieaufwand in Abhängigkeit von dem Wärmebedarf eines Wohnhauses für einen bestimmten Zeitschritt.

2. Stand der Technik

In der Kopplung des Stromsektors mit anderen Energiesektoren bildet der Strom die Primärenergie. Die Kopplung von Strom- und Wärmesektor durch Power-to-Heat, erfolgt durch Elektrowärmepumpe, Elektroheizung und -speicher. Neue Verknüpfungen sind derzeit Gegenstand von Forschung und von Studien für die Entwicklung und Verbesserung der Energiesektoren. Dazu gehören die Elektromobilität und Stromkraftstoffe im Strom- und Verkehrssektor, und das Power-to-Gas im Strom- und Gassektor. Für Verbesserungen im Strom- und Verkehrssektor fordert Hermann Albers, Präsident des Bundesverbands Windenergie (BWE), aus einer Studie der Agentur für Erneuerbare Energien (AEE)¹, die Sektoren Strom, Wärme und Transport miteinander zu koppeln, um Klimaschutzziele besser zu erreichen. Darüber hinaus ist Durchführung der ersten Schnittstelle zwischen den Sektoren Strom, Wärme, Transport und der Industrie noch leistbar, da erneuerbare Stromüberschüsse sich sinnvoll zur Versorgung im Wärme- und Verkehrssektor produktiv nutzen lassen. Für einen schnellen Schritt in Richtung Mobilität und Wärme müssen Schnittstellen geschaffen werden, die erneuerbare Energie für diese Bereiche nutzbar machen. Dieser strukturierte verlässliche Weg aus der Braunkohle führt zu einer Kosten- und CO₂-Emissionensenkung.

2

Meine Studie stellt die Folgen des Einsatzes dieser Koppelstelle im Bezug auf Emissionen und Kosten dar. Im Gegensatz dazu wurden andere elektrothermische Koppelstellen für die Heiztechnik mit direkter Energieaufnahme aus natürlichen Quellen erforscht. Diese erweitern den Einsatz von Ökostrom. Viele Studien von Studierenden in der Energietechnik² basieren auf dem Einsatz von Heizungsanlagen mit konventionellen Methoden wie Gas oder Öl und vergleichen sie mit den Elektroheizungsanlagen, woraus schließlich folgt, dass der Einsatz von Elektroheizungen sich nicht mehr lohnt, jedoch mit der Entwicklung der erneuerbaren Energien, der elektrische Ökostrom die beste Wahl für die Heiztechnik sein kann.

¹ Artikel aus http://www.stadt-und-werk.de/meldung_23643_Kopplung+der+Energiesektoren.html

² Ingenieur Joaquin Pampillon aus der Universität von Vigo (Spanien). <http://tv.uvigo.es/video/25996.html>

3. Kopplung von Energiesektoren

Mittels Energiesektoren wird eine Klassifizierung bzw. Einteilung der einzelnen spezifischen Gruppen des Energiebedarfs vorgenommen; die aktuell bedeutendsten Energiesektoren sind Elektrizität, Wärme und Gas. Eine Verbesserung und Weiterentwicklung der einzelnen Technologien, die im Haushalt sowie der Industrie eingesetzt werden, wird durch deren Kopplung erreicht. Als Ziele stehen Kostenoptimierungen, Emmissionsverringerungen und Qualität sowie Komfort im Vordergrund. Abb. 1 verdeutlicht, wie eine solche Kopplung im Speziellen zu verstehen ist.[14]

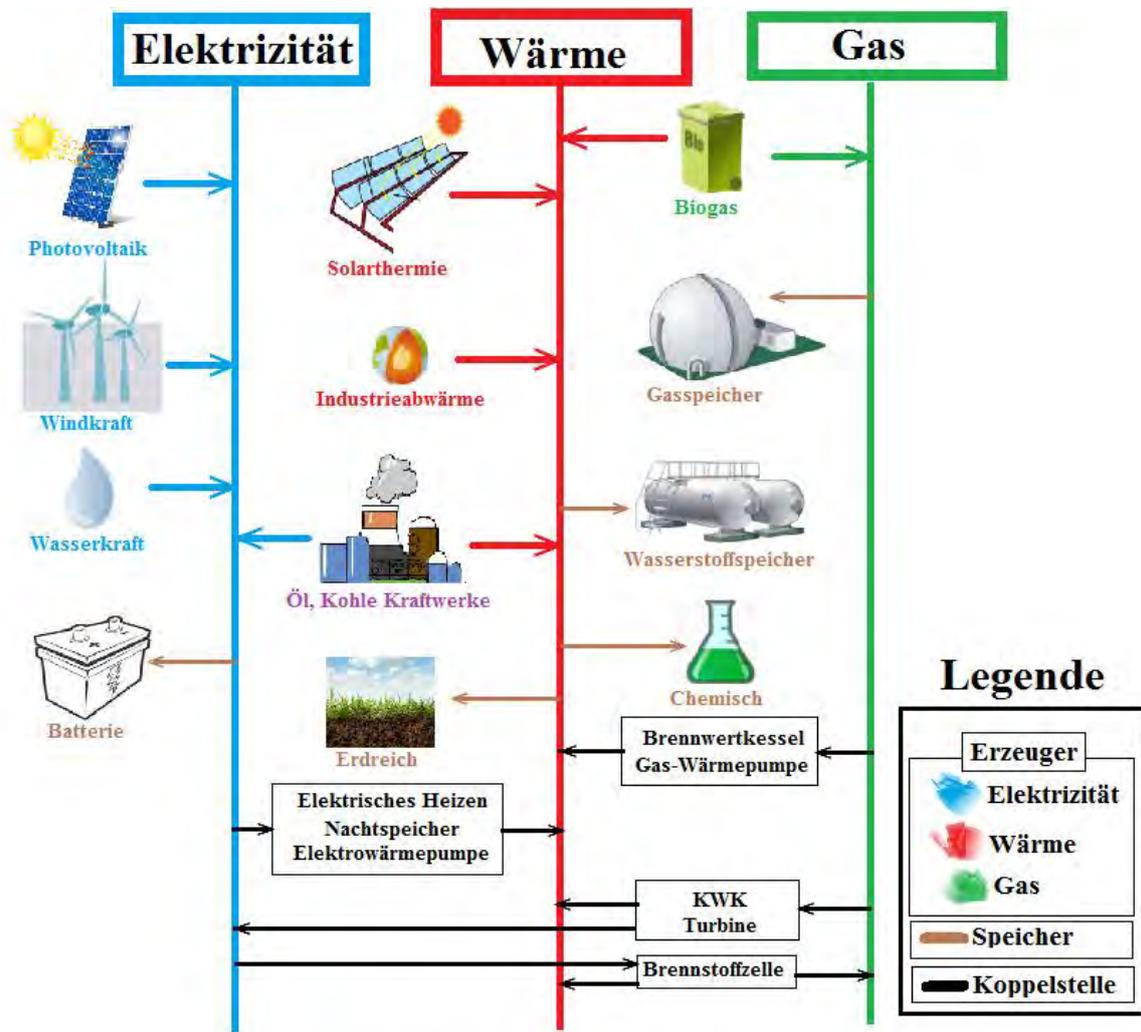


Abb 1. Darstellung der Kopplungen und Energiesektoren

Elektrizität wird entweder aus erneuerbaren (regenerativen) Energien oder aus nicht-erneuerbaren Energien (Ressourcen) gewonnen. In beiden Fällen handelt es sich um die Umwandlung einer Primärenergie, zum Beispiel chemische Reaktionen, Solar- oder Kernenergie, zu elektrischer Energie. Diese Umwandlung bezieht ebenso eine Kopplung von Energiesektoren ein, jedoch auf primärer Ebene und muss daher nicht näher berücksichtigt werden. Die Energieumwandlung findet in elektrischen Kraftwerken unter Verwendung der jeweiligen Primärenergie statt. In der Regel erfolgt diese Umwandlung durch einen Generator. Das Antriebsprinzip variiert je nach Primärenergie, jedoch ist die Funktionsweise eines Generators nicht abhängig von der ursprünglichen Energie, sondern von der Art, durch die sie zugeführt wird. Die somit umgewandelte elektrische Energie wird aus den Kraftwerken in die Städte und Regionen im Verlauf des Tages je nach Verbrauch mittels entsprechender Verkabelung transportiert.

Die Industrie und deren Produktionsmenge, die meteorologischen Bedingungen, der Verbrauch der Wohnhäuser und die Jahres- sowie Uhrzeit sind die wichtigsten Faktoren zur Bestimmung des Leistungsbedarfs. Die erzeugte und transportierte Energie wird durch die Kopplung von Energiesektoren im Haushalt oder in der Industrie je nach Möglichkeit und Bedarf verwendet. Einige Kraftwerke arbeiten mit den natürlichen Energiequellen aus der Umgebung. Dazu wird eine Flüssigkeit erwärmt; das Erwärmungsverfahren erzeugt eine Leistung, die dazu benutzt wird, einen Wechselstromgenerator anzutreiben, welcher letztendlich elektrische Energie als Endprodukt erzeugt. Dies ist ein gutes Beispiel für eine Wärme-Elektrizitäts-Kopplung.

Die typischen Wärmequellen, aus denen Energie extrahiert wird, sind das Erdreich und die Sonne. Solarenergie und Erdwärme lassen sich beide für den Wärmesektor nutzen. Ein Vorteil der Erdwärme besteht darin, dass jährlich ein nahezu konstanter Wert umgewandelt werden kann, Solarenergie hingegen erfordert Energiespeicher ob der nicht permanent zugänglichen Nutzungsmöglichkeiten (wechselnder Tag/Nacht-Zyklus, Jahreszeiten, Wetterbedingungen, usw.).

Es gibt drei Aspekte innerhalb der Technologie von Energiekopplung, die berücksichtigt werden müssen. Diese sind Energiequellen, Speicher und Koppelstellen:

Energiequellen: Heutzutage existieren immer mehr Energiequellen, die die Wohnhäuser und allgemein die Menschheit mit Energie versorgen. Diese erneuerbare Energien lassen sich in Windenergie, Sonnenenergie, Wasserkraft, Bioenergie und Geothermie unterscheiden. Als Primärenergiequelle haben sie

sich allerdings noch nicht in der ganzen Welt durchgesetzt. Die Energieerzeugung durch nicht-erneuerbare bzw. konventionelle Energieträger lassen sich in Kohle, Rohöl und Erdgas unterteilen. Sie sind die primär genutzten Energieträger.

Die Umwandlung für die Energieversorgung findet je nach Primärenergieträger in der jeweiligen Energieanlage statt: 1. Kraftwerk, 2. Heizwerk, 3. Heizkraftwerk, 4. Kernkraftwerk, 5. Photovoltaikanlage, 6. Solarkraftwerke, 7. Wasserkraftwerk, 8. Windkraftanlage, 9. Geothermische Kraftwerke und 10. Biomassekraftwerke. [J1]

Speicher: Diese Technologien werden bei der Energiekopplung verwendet, da sie nutzbare Energie zur Verfügung stellen. Sie sind Geräte oder Orte, bei denen eine gewisse Energie gelagert und zu einem späteren Zeitpunkt abgegeben werden kann. Diese Energie, die aus den verschiedenen Sektoren geliefert wird, wird in seinem jeweiligen Speichermedium aufbewahrt. Jedes Speichermedium hat unterschiedliche Eigenschaften für die Funktionsweise der Speicherung.

Ein gutes Beispiel für einen Energiespeicher ist ein Elektrospeicher in der Elektromobilität; der Speicher ist in diesem Fall eine Batterie, die Elektrizität aus erneuerbaren Energien aufnimmt und dann nach Wunsch des Verbrauchers bereitstellt. Es muss unterschieden werden, in welcher Form die Energie gespeichert und abgegeben wird, ob es sich um elektrischen Strom, mechanische Energie, chemische Energieträger oder thermische Energie handelt. Die am häufigsten genutzten Speichergeräte lassen sich wie folgt unterteilen: [F]

- Elektrische/elektro-chemische Energiespeicher: Akkumulatoren, Redox-Flow-Batterien
- Mechanische Speicher: Pumpspeicherwerke, Druckluftspeicher (Kaverne)
- Chemische Energiespeicher: Wasserstoff und Erneuerbares Methan.
- Thermische Energiespeicher: Erdreich, dezentral (Sonne) oder saisonal (Wasser).

Koppelstellen: Die Koppelstelle ist der wichtigste Aspekt, da dieses Projekt sich mit der Studie von Koppelstellen beschäftigt. Hier kann betrachtet werden, wie eine Kopplung überhaupt möglich wird. Je nach Bedarf erfolgt die Kopplung/Umwandlung von Wärme zu Elektrizität oder umgekehrt. Die übliche Koppelstelle zwischen Wärme und Elektrizität ist „Power-to-Heat“, zwischen

Wärme und Gas ist es das KWK, die Turbine, der Brennwertkessel und „Power-to-Gas“.

Sowohl in der Industrie als auch im Haushalt wird sehr häufig die Energieumwandlung von Elektrizität zu Wärme benutzt. Sie ist zwar eine der günstigste Energiekopplungen, aber es entstehen viele Umweltschäden, wenn es sich um nicht-regenerative Energien handelt. Aus diesem Grund liegt der Fokus auf dieser Technologie. Die Kopplung von Strom und Wärme repräsentiert die kostengünstigste Form der Integration erneuerbarer Energien. Die Verlagerung von Stromverbrauch durch die Speicherung mit Batterien trägt ein Vielfaches an Kosten bei, dafür gibt es eine bessere Option in der Verknüpfung von Strom- und Wärmesektoren durch thermische Energiespeicher. Die Kombination von Wärmepumpen, Solarthermie, Wärme- und Kältespeicher birgt großes Potenzial innerhalb der Sektoren Wärme und Elektrizität. Deswegen setzt sich diese Studie mit den „Power-to-Heat“-Technologien auseinander, da ihr Potenzial zur Integration von regenerativem elektrischen Strom sehr hoch ist. Zudem ist „Power-to-Heat“-Kopplung deutlich kostengünstiger in der Umsetzung im Vergleich mit Power-to-Gas sowohl in der Industrie als auch im privaten Haushalt. Es geht darum, die elektrische Energie unabhängig von der Energiequelle zu verwenden und sie in thermische, nutzbare Energie mit den wenigsten Verlusten umzuwandeln. In den nächsten Kapiteln werden die folgenden Technologien in Bezugnahme zur elektro-thermischen Kopplung erläutert und betrachtet:

- Elektrische Wärmepumpe
- Elektrische Heizung
- Elektrische Nachtspeicher

Der nachfolgende und größte Teil der Arbeit basiert auf der Elektrowärmepumpe, die eine Transformation zwischen mindestens drei Energieniveaus verwirklicht. Der Einsatz von Wärmepumpen ermöglicht die Erweiterung von Kopplungen unterschiedlicher Energieströme innerhalb von Gebäuden oder zwischen mehreren Gebäuden und darüber hinaus die Nutzung von Umweltenergie. [H1]

4. Wärmebedarf

Das Ziel einer elektrothermisch gekoppelten Technologie basiert darauf, Wärme aus Elektrizität zu erzeugen. Um den elektrischen Strom zu berechnen, muss der Wärmebedarf bekannt sein. Dieser ist abhängig von der Umgebung, in der er benötigt wird, jedoch unabhängig von den verschiedenen Technologietypen und kann daher als Eingangsparameter für alle Koppelstellen genutzt werden. Nachfolgend gilt es, den Stromverbrauch als Ausgangsparameter für die jeweiligen Technologietypen zu ermitteln.

Die Berechnung des Wärmebedarfs/der Heizleistung ermöglicht die Einrichtung und Verbesserung von Komfortbedingungen und die Ermittlung der notwendigen Wärme für das Warmwasser eines Wohnhauses. Dieser Wert hängt von vielen Faktoren ab: den meteorologischen Bedingungen, dem Verbrauch der Haushaltsgeräte, der Jahreszeit, der Anzahl der Bewohner, der geografischen Position und der Größe des Wohnhauses. Für die Berechnung werden zunächst alle möglichen Raumwärmeverluste ermittelt, diese bestehen aus Transmissionswärmeverlusten, Lüftungshheizlast und Wärmegewinnen.[A1]

7

Transmissionsverluste: Der Transmissionswärmeverlust umfasst die gesamte Wärmemenge des betrachteten Zeitraumes in dem Wohnhaus, die mittels Konduktion durch alle Außenbauteile nach außen fließt, wie beispielsweise durch Wände, Böden oder das Dach.(siehe Kapitel 6). Dieser Wärmestrom wird wie folgt berechnet:

$$\dot{Q}_{tra} = U \cdot A \cdot (T_o - T_i) \rightarrow U = \frac{1}{R_t} \quad (1)$$

- \dot{Q}_{tra} = Transmissionverluste (W).
- R_t = Summe aus allen Schichtwiderständen des Aussenbauteils in ($m^2 \cdot K/W$).
- A = Fläche des Aussenbauteils (m^2).
- U = Wärmedurchgangskoeffizient ($W/m^2 \cdot K$).
- T_o = Aussentemperatur ($^{\circ}C$).
- T_i = Innentemperatur ($^{\circ}C$).

$$R_t = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \rightarrow R_i = \frac{e}{\lambda}$$

- e = Breite der Schicht des Bauteils(m).
- λ = Wärmeleitfähigkeit ($W/m \cdot K$).

Für mehrere Außenbauteile (Türe, Wände, Dächer, usw.) können die Transmissionverluste wie folgt ermittelt werden:

$$\dot{Q}_{tra} = \sum U_i \cdot A_i \cdot (T_o - T_i) \quad (2)$$

$U_i \cdot A_i =$ für jeden Aussenbauteil

Lüftungsheizlast: Der Lüftungswärmeverlust oder die Lüftungsheizlast entspricht der Wärmemenge, die mit der Luft ausströmt und durch alle Fugen nach außen übertragen wird. Das geschieht, wenn die Räume eines Gebäudes gelüftet werden. In der Heizperiode entweicht erwärmte Innenluft nach außen und kalte Außenluft gelangt nach innen. Durch diese Verluste steigt der Energieverbrauch – sie werden als Lüftungsheizlast bezeichnet und wie folgt berechnet:

$$\dot{Q}_{lüf} = \dot{m}_l \cdot C_p \cdot (T_o - T_i) \quad (3)$$

- $\dot{Q}_{lüf}$ = Lüftungsheizlast (W).
- \dot{m}_l = Massenstrom der erneuerten Luft (kg/s).
- C_p = Spezifische Wärme der Luft (1.00467 kJ/kg · K).
- T_o = Aussentemperatur (°C).
- T_i = Innentemperatur (°C).

$$m_l = V_{luft} \cdot \rho_{luft} \rightarrow \dot{m}_l = \frac{m_l}{t} = \frac{V_{luft} \cdot \rho_{luft}}{3600 \text{ sec}}$$

- m_l = Masse der erneuerten Luft (kg).
- V_{luft} = Volumen der erneuerten Luft (m³).
- ρ_{luft} = Dicht der Luft (1.22 kg/m³).

Wärmegewinne: Es können ebenso andere Quellen konstante Energie in das Wohnhaus liefern. Die Solarenergie spielt hierbei eine Rolle, da eine nicht unerhebliche Wärmemenge in den Raum durch Sonnenstrahlen übertragen werden kann. Diese Energie kann sowohl durch die Einstrahlung als auch durch die Erwärmung des Hauses Verwendung finden. Die anderen Quellen, die benötigte Heizenergie reduzieren, sind: Beleuchtung, Elektrogeräte und der Mensch selbst.

Letztendlich werden all jene Wärmegewinne in der Summe groß genug sein, um in die Energiebilanz des Wärmebedarfs mit einbezogen werden zu müssen.

Der Wärmegewinn durch die Sonnenstrahlen wird jedoch nicht mitberechnet, weil er von sehr vielen komplexen und unbekanntem Faktoren abhängt.

Die Wärmegewinne lassen sich wie folgt berechnen:

$$\dot{Q}_{gew} = \dot{Q}_{Licht} + \dot{Q}_{Geräte} + \dot{Q}_{Mensch} \quad (4)$$

- Lichtwärme $\rightarrow \dot{Q}_{Licht} = q_l \cdot A_l \cdot \alpha$ (5)
 - q_l = Durchschnittliche Lichtenergie pro Etagenfläche des Hauses (W/m^2)
 - A_l = zu leuchtende Etagenfläche (m^2).
 - α = Nutzungsfaktor der Beleuchtung im Haus.

- Wärme aus den Geräten

$$\dot{Q}_{Geräte} = (\sum \text{Heizlast des einzelnen Gerätes}) \cdot \alpha \quad (6)$$

- Wärme des Menschen $\rightarrow \dot{Q}_{Mensch} = \dot{Q}_{sensibel} + \dot{Q}_{Latent}$ (7)

Die Raumwärmeverluste und Wärmegewinne ergeben sich durch folgende Formel:

$$\dot{Q}_{Raum} = \dot{Q}_{tra} + \dot{Q}_{lüf} - \dot{Q}_{gew} \quad (8)$$

Für die Berechnung des Verbrauchs eine Heizungsanlage unabhängig von der Art, wird es einen Wärmebedarf benötigt. Diese Wert ist bei allen Koppellstellen der Energie sektoren gemeinsam. Als Eingangsparameter der Wärmepumpenanlage, der Elektroheizung und des Nachtspeicherofens lässt sich der Wärmebedarf wie folgt ermitteln:[\[A1\]](#)

Als Beispiel wird es ein normales Ein-Familien-Haus mit 4 Zimmern und 2 Etagen angenommen.

Eigenschaften des Hauses:		
Anzahl der Bewohner: 4 Personen.		
Aussenbauteil	Grösse	Gesamte Summe
gesamte Haushöhe	6.5 m	6.5 m
gesamtes Volumen	585 m ³	585 m ³
Fläche der Aussenwände	2x45 + 2x27 m ²	144 m ²
Fläche der Zwischenebenen	90 m ²	90 m ²
Dachfläche	105 m ²	105 m ²
Fläche der Türe	8 + 2 m ²	10 m ²
Fläche der Fenster	12 + 4 + 6 m ²	20 m ²

Tabelle 1. Eigenschaften des Wohnhauses

Zu allererst werden die Transmissionsverluste berechnet. Sie hängen von den Eigenschaften des Hauses ab. Tabelle 2 zeigt den durchschnittlichen Wärmedurchgangskoeffizient der Außenbauteile eines Hauses.

Transmissionsverluste:

Bauteil	Massnahme	Wärmedurchgangskoeffizient U _{max} [W/m ² .K]
Aussenwände	Erstmaliger Einbau	0.45
Fussböden	Erstmaliger Einbau	0.5
Dächer	Erstmaliger Einbau	0.3
Aussenfenster	Ersatz	1.7
Aussentüre	Ersatz	2.9

Tabelle 2. Wärmedurchgangskoeffizient der Bauelemente des Hauses

Die gesamte Transmissionwärme ist die Summe aus allen Wärmeübertragungen durch die einzelnen Außenbauteile. Tabelle 3 gibt durch die Formel 2 Auskunft über die Summe aus dem Produkt der einzelnen Flächen mit dem jeweiligen Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils an.

Bauteil	Fläche des Bauteils (A _i)	Wärmedurchgangskoeffizient U _{max} (U _i) [W/m ² .K]	A _i · U _i [W/K]
Aussenwände	144 m ²	0.45	64.8
Fussböden	90 m ²	0.5	45
Dächer	105 m ²	0.3	31.5
Aussenfenster	10 m ²	1.7	17
Aussentüre	20 m ²	2.9	58
Gesamte Summe der Multiplikation der einzelnen Fläche und Wärmedurchgangskoeffizient			216.3

Tabelle 3. Produkt von Flächen und Durchgangskoeffizienten

$$\dot{Q}_{tra} = 0.2163 \left[\frac{kW}{K} \right] \cdot (T_o - T_i) [K]$$

Lüftungsheizlast:

Für die Lüftungsheizlast wird der Massenstrom der Luft benötigt:

Das gesamte Volumen der Luft im Haus entspricht nahezu dem Gesamtvolumen des Hauses. Es wird davon ausgegangen, dass das Ausströmen der Luft durch Fugen an den verschiedenen Außenbauteilen stattfinden kann. Dieser Wert darf nicht größer als 30 Prozent der gesamten Lüftungsheizlast sein.

$$\dot{Q}_{\text{lüf}} = \frac{V_{\text{luft}} \cdot \rho_{\text{luft}}}{3600 \text{ s}} \cdot c_p \cdot (T_o - T_i) \cdot \frac{(100\%+30\%)}{100\%}$$

- $c_p = 1.00467 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$
- $V_{\text{luft}} = \text{Haushöhe} \times \text{Bodenfläche} = 6.5 \text{ m} \times 90 \text{ m}^2 = 585 \text{ m}^3$.
- $\rho_{\text{luft}} = 1.22 \text{ kg/m}^3$

$$\dot{Q}_{\text{lüf}} = \frac{585 \text{ [m}^3\text{]} \cdot 1.22 \text{ [kg/m}^3\text{]}}{3600 \text{ s}} \cdot 1.00467 \text{ [kJ/kg} \cdot \text{K]} \cdot 1.3 \cdot (T_o - T_i)$$

11

$$\dot{Q}_{\text{lüf}} = 0.259 \cdot (T_o - T_i) \text{ [kW]}$$

Wärmegewinne:

- ❖ Durchschnittliche erzeugte Lichtwärme:

$$\dot{Q}_{\text{Licht}} = q_l \cdot A_l \cdot \alpha$$

- $q_l = 12 \text{ W/m}^2$ für ein Ein-Familien-Wohnhaus.
- $A_l = 2 \text{ Etagen} \times 90 \text{ m}^2 = 180 \text{ m}^2$
- $\alpha = 20 \%$

$$\dot{Q}_{\text{Licht}} = 12 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \cdot 180 \text{ [m}^2\text{]} \cdot 0.2 = 432 \text{ W} = 0.432 \text{ kW}$$

- ❖ Heizlastung der Geräte: Die Tabelle 4 listet die durchschnittlich erzeugte Wärme durch die Nutzung der üblichen Geräte eines Familienwohnhaus auf:

Gerät	Anzahl	Heizleistung pro Gerät [Watt]	Gesamte Heizleistung[W]
Fernseher	4	150	600
Computer	3	250	750
Kühlschrank	1	30	30
Waschmaschine, Spülmaschine	1	100	100
sonstige	-	50	50
Gesamte Heizleistung			1530

Tabelle. 4. Heizleistung der Hausgeräte

Der Nutzungsgrad der Geräte ist je nach Familie unterschiedlich, als Durchschnitt wird von einem Nutzungsgrad von circa 60% ausgegangen:

$$\dot{Q}_{Geräte} = \sum \text{Heizlast des einzelnen Gerätes} \cdot \alpha$$

- $\sum \text{Heizlast des einzelnen Gerätes} = 1530 \text{ W} = 1.53 \text{ kW}$
- $\alpha = \text{Nutzungsgrad der Geräte} = 60 \% = 0.6$

12

$$\dot{Q}_{Geräte} = 1.53 \times 0.6 = 918 \text{ W} = 0.918 \text{ kW}$$

- ❖ Erzeugte Wärme der Bewohner: Es ist wissenschaftlich erwiesen, dass eine Person ungefähr eine Heizlast von 100 W bei normalen Bedingungen erzeugt.

$$\dot{Q}_{1_Person} = \dot{Q}_{sensibel} + \dot{Q}_{Latent} = 60 + 40 = 100 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{Mensch} = n^{\circ} \text{ Personen} \cdot \dot{Q}_{1_Person} = 4 \times 100 = 400 \text{ W} = 0.4 \text{ kW}$$

Somit ergibt sich die Berechnung der gesamten Wärmegewinne in dem betrachteten Wohnhaus:

$$\dot{Q}_{gew} = \dot{Q}_{Licht} + \dot{Q}_{Geräte} + \dot{Q}_{Mensch} = 0.432 + 0.918 + 0.4 = 1.75 \text{ kW}$$

Der Zeitraum, in dem die Heizgeräte ausgeschaltet werden, ist ziemlich lang, was der Heizlast am nächsten Tag für die ersten Stunden erhöht. Deswegen wird nicht mit einer gesamten Gewinnleistung gerechnet, sondern mit einem um 30 Prozent erhöhten Gesamtwert:

$$\dot{Q}_{Raum_ideal} = \dot{Q}_{tra} + \dot{Q}_{lüf} - \dot{Q}_{gew}$$

$$\dot{Q}_{Raum} = 1.3 * (\dot{Q}_{tra} + \dot{Q}_{lüf}) - \dot{Q}_{gew}$$

$$\dot{Q}_{Raum} = 1.3 * [0.2163 \cdot (T_o - T_i) + 0.259 \cdot (T_o - T_i)] - 1.75 \text{ kW}$$

Neben der Raumheizung gibt es auch die Möglichkeit eine Warmwasserbereitung zur Verfügung zu stellen. Sie lassen sich in zwei Systeme unterteilen: die zentrale Warmwasserbereitung sowie die dezentrale Warmwasserbereitung. Für die Kopplung mit einem Heizsystem wie eine Wärmepumpe oder eine elektrische Heizung wird hier von einer zentralen Warmwasserbereitung ausgegangen. Der Heizbedarf dieser optionalen Warmwasserversorgung für ein Ein-Familienhaus (im Beispiel betrachtet) liegt zwischen 5 und 6 kW. Als Mittelwert wird 5.5 kW angenommen. Ein Haushalt verbraucht circa 12 Prozent der Gesamtenergie für die Wasserbereitung.

$$\dot{Q}_{Wasser} = 5.5 \text{ kW}$$

Am Ende lässt sich der gesamte Wärmebedarf des Wohnhauses berechnen:

$$\dot{Q}_s = \dot{Q}_{Raum} + \dot{Q}_{Wasser}$$

$$\dot{Q}_s = 1.3 * [0.2163 \cdot (T_o - T_i) + 0.259 \cdot (T_o - T_i)] - 1.75 \text{ kW} + 5.5 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_s \cong 0.618 \cdot (T_o - T_i) + 3.75 \text{ kW}$$

5. Elektrische Wärmepumpe

5.1. Prinzip und Einteilung einer Wärmepumpe

5.1.1. Das Arbeitsprinzip

Eine Wärmepumpe ermöglicht es, durch einen thermodynamischen Kreisprozess, Wärme von einer Quelle mit sehr niedriger Temperatur mit Hilfe einer mechanischen Antriebsenergie zu einem wärmeren Raum zu transferieren. In dem Prozess zirkuliert ein Kältemittel, das einen sehr geringen Siedepunkt besitzt und bei niedrigen Temperaturen verdampft. Bei dem gesamten Prozess wird geringe externe Energie benötigt, das heißt, eine Wärmepumpe benötigt weniger elektrische Energie als die nutzbare Energie, die sie abgibt. Im Idealfall ist die abgegebene Energie die Summe der Antriebsenergie und der aufgenommenen Umgebungsenergie. Moderne Wärmepumpe können mit Hilfe einem Vierwege-Drosselventil (siehe Kapitel 5.3.3) sowohl im Winter als auch im Sommer verwendet werden. In beiden Fällen wird die Wärme aus der kalten Umgebung aufgenommen und in die warme Umgebung abgegeben. Dieser Kreisprozess basiert auf vier Prozessstufen, in denen das Kältemittel immer unterschiedliche Aggregatzustände hat. Diese Prozessschritte finden in jeweils unterschiedlichen Bauteilen statt: Abbildung 2 stellt den Kreisprozess in vier Stufen mit den jeweiligen vier Bauteilen dar. [A2]

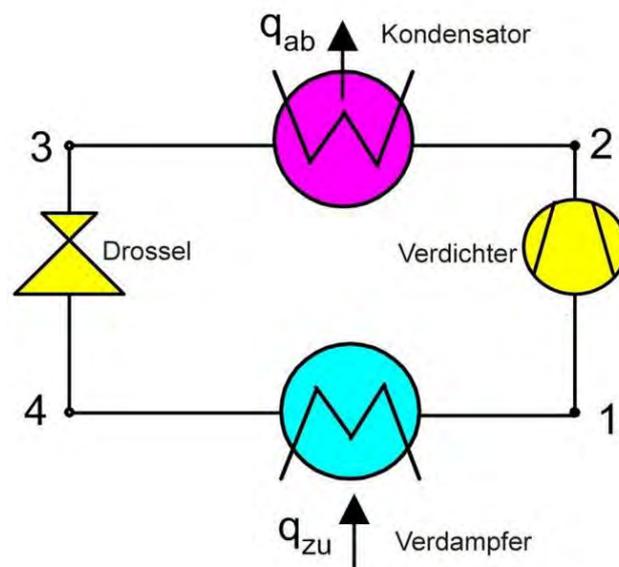


Abb 2. Schaltbild einer Wärmepumpe [wikimedia]

- Prozessstufe 1 → 2: Verdichter (auch oft Kompressor genannt).
- Prozessstufe 3 → 4: Drosselventil.
- Prozessstufen 2 → 3 und 4 → 1: Zwei Wärmetauscher oder Wärmeüberträger (Verdampfer und Kondensator).

5.1.2 Einteilung einer Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe lässt sich wie in der folgenden Erklärung einteilen: [A3]

Einteilung nach der Art des Kreisprozesses:

- Wärmepumpen, deren Kompressor mechanisch durch Elektro-, Gas-, Diesel Motoren angetrieben wird, lassen sich unter dem Begriff Kompressionswärmepumpen unterscheiden.
- Die Wärmepumpen, die thermisch angetrieben werden, nennen sich Sorptionswärmepumpen.
- Elektrothermische Wärmepumpen, die nach dem Peltiereffekt arbeiten.

15

Einteilung nach Wärmequellen und Wärmenutzungsanlage:

Unabhängig von der Art, können Wärmepumpen nach den jeweils verwendeten Wärmequellen und den Wärmesenken unterschieden werden.

- Wasser/Wasser-Wärmepumpen (Wärmequelle: Wasser, Wärmenutzungsanlage: Warmwasserheizung).
- Wasser/Luft-Wärmepumpen (Wärmequelle: Wasser, Wärmenutzungsanlage: Warmluftheizung).
- Luft/Wasser-Wärmepumpen (Wärmequelle: Aussenluft, Wärmenutzungsanlage: Warmwasserheizung).
- Luft/Luft-Wärmepumpen (Wärmequelle: Aussenluft, Wärmenutzungsanlage: Warmluftheizung).
- Sole/Wasser-Wärmepumpen (Wärmequelle: Erdreich, Wärmenutzungsanlage: Warmwasserheizung).

Einteilung nach Betriebsweisen:

- **Monovalente Betriebsweise:** Eine Wärmepumpe die monovalent betrieben ist, setzt voraus, dass der Wärmeerzeuger den notwendigen Wärmebedarf für die Raumheizung und das Warmwasser ohne zusätzlichen Heizgeräte erreichen kann. Um diese Voraussetzung erfüllen zu können, ist es notwendig eine konstante Wärmequelle mit gleichmässigen Temperaturen zur Verfügung zu stellen. Energiequellen wie Erdreich und Grundwasser ermöglichen einen monovalenten Betrieb.
- **Monoenergetische Betriebsweise:** Bei dieser Art übernimmt die Wärmepumpe den Hauptteil des Heizsystems. Das heisst, es wird eine automatische elektrische Zusatzheizung eingeschaltet wenn die Aussentemperatur zu stark sinkt. Es wird also nur eine Energieart verwendet. Zum Einsatz kommt diese Betriebsweise in den meisten Fällen bei der Luft/Wasser-Wärmepumpe.
- **Bivalente Betriebsweise:** Bei dieser Betriebsweise wird ein zweites Heizsystem nebenbei eingesetzt, welches die Wärmepumpe bei tieferen Aussentemperaturen unterstützt. Bei dem Einsatz können Öl- oder Gasheizsysteme verwendet werden.

Einteilung nach der Art der Antriebsenergie:

Je nach der Art der Antriebsenergie wird unterschieden in:

- Elektrowärmepumpen
- Gaswärmepumpen
- Dieselwärmepumpen

Einteilung nach der Aufgabe, zu der die Wärmepumpe dient:

- Heizungswärmepumpen: Für das Heizen von Räumen und Warmwasserbereitung.
- Wärmerückgewinnungs-Wärmepumpen: Wärmeverluste anheben und anderen Wärmeprozessen zuführen.
- Entfeuchtungs-Wärmepumpen: Luftentfeuchtung in Trockenanlagen.
- Kälte-Wärmepumpenanlagen: Räume kühlen.

5.2. Wärmepumpenarten

Für den Haushalt werden heutzutage verschiedene Arten von Wärmepumpen verwendet, die für die Heizung und Klimatisierung von Bedeutung sind. Eine der am häufigsten verwendeten Wärmepumpe ist die Luf/Luft –Wärmepumpe für ihrer einfachen Anschaffung platztechnisch/finanziell. Direkt gefolgt wird sie von der Luft/Wasser –Wärmepumpe. Sie ist für die Warmwasserbereitung geeignet. Beide Wärmepumpen haben zwar eine gemeinsame und die kostengünstigste Wärmequelle, jedoch schneiden sie im Vergleich mit anderen Wärmepumpenarten im Hinblick auf die Energieeffizienz schlechter ab.

Die Verwendung und Anschaffung einer Wärmepumpe hängt von der Wärmequelle und deren Wärmenutzung ab.[1][A5]

5.2.1. Wärmequellen

Wärmequelle Grundwasser: Mit Hilfe einer Brunnenanlage, die mit ausreichend Wasser in einer angemessenen Tiefe vorhanden ist, kann die benötigte Wärme aufgenommen und dem Heizsystem zugeführt werden. Das Temperaturniveau steht ganzjährig konstant zur Verfügung. Damit eignet es sich als Wärmequelle für eine Heizanlage und garantiert einen optimalen Heizbetrieb.

Wärmequelle Aussenluft: Bei vielen Wohnhäusern, insbesondere Hochhäusern /Massenwohnhäusern, steht keine Wärmequelle wie Grundwasser oder das Erdreich zur Verfügung; dann verbleibt lediglich die Nutzung der Außenluft als Wärmequelle. Diese Energiequelle ist ebenso eine kostengünstige Option, da sie frei zugänglich ist. Bei der Verwendung der Luft als Wärmequelle wird ein Luftvolumenstrom durch den Verdampfer transportiert, der sich in der äußeren Umgebung befinden muss, damit die Energieübertragung gewährleistet werden kann. Im Gegensatz zum Grundwasser oder dem Erdreich, ist die Umgebungstemperatur die Außenlufttemperatur, die im jahreszeitlichen Verlauf sehr stark schwankt, was sich negativ für die Effizienz der Wärmepumpenanlage auswirkt.

Wärmequelle Erdreich: Da die Erde durch die Sonnenenergie und das Regenwasser ein guter Wärmespeicher ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Erdtemperatur auch an sehr kalten Wintertagen das notwendige Temperaturniveau bereitstellen kann, um eine konstante Wärme für den Betrieb einer Wärmepumpenanlage aufzunehmen.

5.2.2. Arte von Wärmepumpen

Die folgende Bezeichnung der Norm-Nennbedingung ist die Kurzbeschreibweise einer Wärmepumpe und beschreibt, um welche es sich handeln soll. [E2] [E3]

Beispiel:

Kurzbeschreibweise	Wärmepumpenart
B0 / W35	Sole/Wasser -Wärmepumpe
W10 / W35	Wasser/Wasser -Wärmepumpe
A2 / W50	Luft/Wasser -Wärmepumpe

Tab. 5. Kurzbeschreibweise einer Wärmepumpenanlage

Kennzeichen	Beschreibung
B	Medium der Wärmequelle (B: brine oder Sole), (W: Water oder Wasser), (A: Air oder Luft).
0	Temperatur der Wärmequelle.
W	Medium der Wärmenutzungsanlage
35	Temperatur der Wärmenutzungsanlage.
Sole/Wasser-Wärmepumpe $T_c = 35^\circ$ $T_f = 0^\circ$	

Tabelle 6. Beschreibung der Kennzeichen für die Kurzbeschreibweise

5.2.2.1. Luf/Luft –Wärmepumpe

Diese Art von Wärmepumpen wird bei kontrollierter Wohnraumlüftung verwendet, die den Raum durch Luftströmung mit Hilfe eines Ventilators an den Wärmetauschern heizen bzw. kühlen kann. Bei den Wärmetauschern wird die Wärme nur an das Kältemittel durch die Luft übertragen. Diese Wärmepumpen arbeiten im Kühlbetrieb reversibel und dienen zudem als Klimaanlage. [D2]

Vorteile:

- Wärmequelle hat keine Kosten.
- Reversibler Prozess.

Nachteile:

- Geräuschbildung möglich.
- nicht immer ein monovalenter Betrieb möglich.
- Bei zentraler Luftheizung müssen Luftkanäle ohnehin installiert werden, auch wenn die Luft mit einem anderen Wärmeerzeuger erwärmt wird.
- Ungeeignet, wenn das Haus oder Wohnung nicht luftdicht ist.
- Ggf. paralleles Heizsystem nötig.
- Geeignet nur für Häuser mit Heizlast unter 10 W/m².

5.2.2.2. Luft/Wasser –Wärmepumpe

Die Funktionsweise solcher Wärmepumpen basiert auf einem Ventilator, der Umgebungsluft über den Verdampfer der Wärmepumpe absaugt. Hierbei wird Wärme entzogen.

Die Komponenten oder Bauteile des Wärmepumpenkreislaufes sind nicht zwingend in einem Hauptgerät miteinander verbunden. Kompressor, Verflüssiger und Drosselsystem befinden sich innerhalb des Gebäudes, nur der Verdampfer wird außerhalb aufgestellt. Dadurch ist es möglich, ein hohes Volumen der Umgebungsluft durch den Verdampfer zu transportieren. Ebenfalls zu beachten ist, dass bei einer Außenaufstellung des Verdampfers, aufgrund der sinkenden Außentemperaturen bis in den Minusgradbereich, sein COP-Wert und auch Wirkungsgrad kleiner werden können.

Das große Problem bei einer solchen Anlage ist der Wasserdampf in der Luft. Dieser liegt je nach Außentemperatur und Witterungsbedingung in unterschiedlich großer Menge vor und wird bei sinkenden Temperaturen von der Luft in Form von Wasser abgegeben. Dieses Wasser kondensiert an der Oberfläche des Wärmeübertragers und bei Temperaturen unter 0 °C kommt es unvermeidbar zur Eisbildung, wodurch der Wirkungsgrad unweigerlich verkleinert wird. Um eine starke Vereisung zu vermeiden, ist bei vielen Verdampfern eine Abtauvorrichtung integriert. Dieses System kehrt den Kreisprozess kurzzeitig um. Die Kühlrippen werden enteist und gleichzeitig von Verunreinigung befreit.[D3]

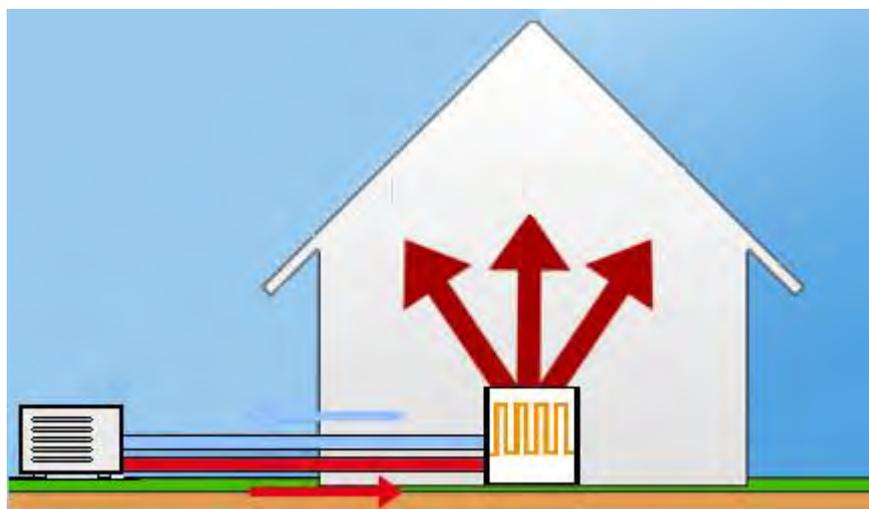


Abb. 3. Wärmepumpenanlage mit Aussenluft als Wärmequelle

Vorteile:

- In Neu- und Altbauten möglich.
- Die niedrigsten Investitionskosten im Vergleich zu anderen Wärmepumpen.

- Kleine Aufstellfläche.
- Keine aufwendigen Grabungen oder Bohrungen im Boden.

Nachteile:

- An kalten Tagen elektrisches Nachheizen oder Parallelbetrieb mit Brennstoffkessel.
- Lärmschutz beachten wegen möglichem Ventilatorgeräusch.

5.2.2.3. Wasser/Wasser –Wärmepumpe

Bei einer solchen Anlage muss die Realisierung über den Aufbau einer Brunnenanlage erfolgen. Darüber hinaus muss ausreichend Grundwasser in einer angemessenen Tiefe vorhanden sein. Ab einer Tiefe von 2 Metern, kann von einer konstanten Wassertemperatur zwischen 8 °C und 12 °C ausgegangen werden, da Grundwasser das ganze Jahr eine konstante Temperatur von ca. 10 °C behält. Mit Hilfe einer Förderpumpe wird das Grundwasser entnommen und zur Wärmepumpe geleitet. Das geförderte Brunnenwasser wird dem Verdampfer zugeführt. In dem Verdampfer wird dann dem Wasser die notwendige Energie für den Wärmepumpenkreislauf entzogen. Nach diesem Vorgang wird das Wasser an den Grundwasserkreislauf zurückgegeben. Das Kältemittel bekommt die Wärme von dem Verdampfer und gibt sie an den Kondensator wieder ab. Um die Effizienz der Heizung zu gewährleisten, sollten der Sicker- und Saugbrunnen mindestens 15 Meter Abstand voneinander haben, somit wird ein thermischer Kurzschluss verhindert, das heißt, dass das Grundwasser genügend Zeit hat, sich thermisch zu regenerieren und beide Brunnen sich nicht wassertechnisch beeinflussen. [D4]

Vorteile:

- Ein sehr guter Wirkungsgrad (Jahresarbeitszahl bis 4,5).
- Niedrige Betriebskosten.
- Keine Zusatzheizung nötig.

Nachteile:

- Abhängigkeit von (stabilem) Grundwasserspiegel, -Temperatur und -Qualität.
- Teure und aufwendige Brunnenbohrung.
- Genehmigungspflicht der Anlage.
- Eisenhaltiges Wasser verschlammte die Rohredie.
- Zu einsetzende kommende Förderpumpen benötigen relativ viel Strom, welche die Jahresarbeitszahl negativ beeinflussen können.

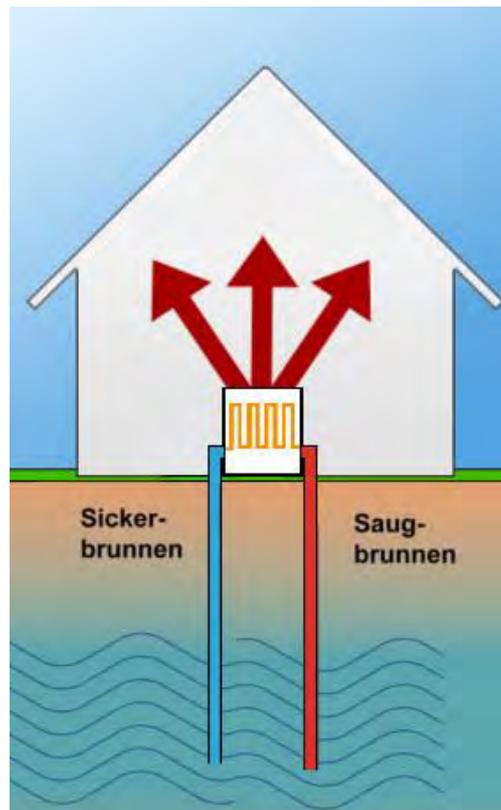


Abb. 4. Wasser/Wasser –Wärmepumpenanlage

5.2.2.4. Sole/ Wasser – Wärmepumpe

Aufgrund der Beschaffenheit des Erdreiches, ist es ein sehr guter Wärmeabsorber und ebenso ein guter Wärmespeicher. Eine Wärmepumpenanlage entzieht die gespeicherte Energie dem Erdreich und überträgt sie auf das Kältemittel. Die Voraussetzungen für den zuvor beschriebenen Kreisprozess sind somit gegeben.

Innerhalb der Nutzungszeit des Erdreichs wird die Nutzungsfläche ausgekühlt und daher ist es notwendig darauf zu achten, dass sich diese Fläche thermisch regeneriert, um einen konstanten Wärmestrom garantieren zu können

Bei Wärmepumpen mit Wärmezufuhr durch das Erdreich stehen zwei verschiedene Technologien zur Verfügung, um die Wärme der Erde zu entziehen. Die erste ist die Wärmegewinnung mit Erdkollektoren; diese werden unter der Erde horizontal verlegt, um der Oberfläche Wärme zu entziehen. Wenn die Freifläche nicht groß genug ist, um Erdkollektoren zu verlegen, dann ist es sinnvoll, die zweite Variante zu nutzen. In dieser werden Erdsonden verwendet, welche senkrecht in die Erde befördert werden. Dazu ist es notwendig, eine Tiefbohrung vorzunehmen, deren Tiefe sowohl von dem

notwendigen Wärmebedarf des Gebäudes als auch von der Bodenbeschaffenheit abhängig ist. [D5][1]

Kollektor-Leistung: Trockene Böden produzieren ca. 10 Watt/m², feuchte Böden sogar bis zu 40 Watt/m².

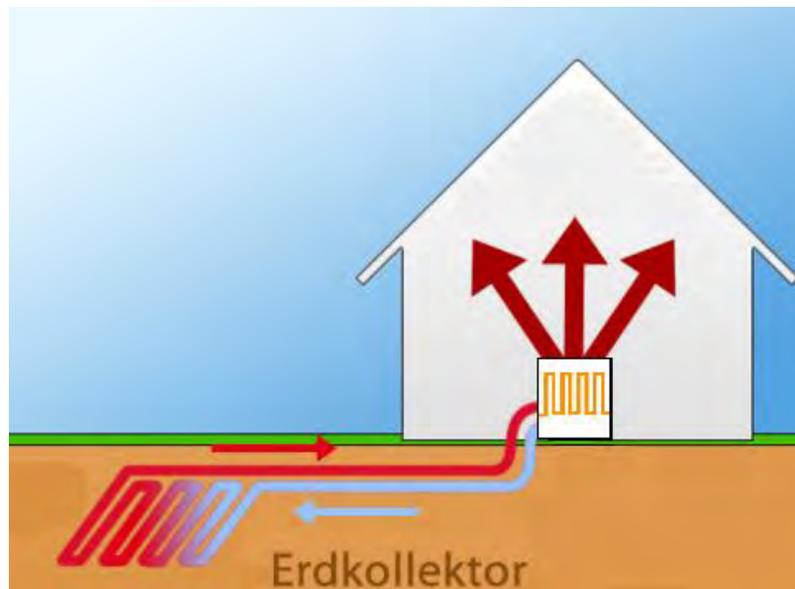


Abb. 5. Sole/ Wasser –Wärmepumpenanlage mit Erdkollektoren

Vorteile:

- Niedrige Betriebskosten.
- Guter Wirkungsgrad.
- Keine Zusatzheizung notwendig.
- Kombination mit Solarthermie möglich.

Nachteile:

- Relativ teure Anschaffung und Installation.
- Bodengutachten nötig.
- Abhängigkeit von Bodenqualität.
- Große unbebaute Grundstücksfläche nötig.
- Pflichtabstand zu Wasserleitungen wegen Frostgefahr durch Wärmeentzug

Erdsonde-Leistung: Die Sole – Vermischung aus Wasser und Frostschutzmittel- zirkuliert in den Sonden und erbringt eine Entzugsleistung von 30 bis 100 Watt pro Tiefenmeter. Die Jahresarbeitszahlen liegen bei circa 4.5.

Vorteile:

- Sehr guter Wirkungsgrad.
- Niedrige Betriebskosten.
- Keine Zusatzheizung notwendig.

Nachteile:

- Bodengutachten nötig.
- Abhängigkeit von Bodenqualität.
- Genehmigungspflicht.

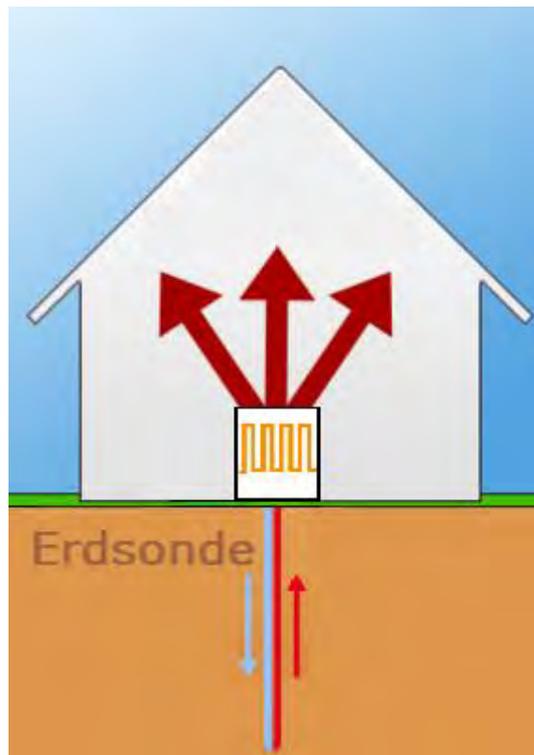


Abb. 6. Sole/ Wasser –Wärmepumpenanlage mit Erdsonden

5.3. Bauteile einer Wärmepumpe

5.3.1. Wärmetauscher

In dem Wärmepumpenkreislauf dienen die Wärmetauscher zur Wärmeübertragung zwischen der Umgebung und dem Kältemittel. Als Wärmetauscher in einer Wärmepumpenanlage lassen sich zwei Arten unterscheiden: der Verflüssiger (Kondensator) und der Verdampfer. [C]

5.3.1.1. Der Kondensator

Der Kondensator oder Verflüssiger ist ein Wärmeüberträger, in dem die aus der Umgebung aufgenommene Wärmeleistung in den Zielraum übertragen wird. In diesem Wärmetauscher fließt das rein gasförmige Kältemittel ein, und wird durch die Wärmeübertragung mit einem konstanten Druck verflüssigt.

5.3.1.1. Verdampfer

In diesem Wärmetauscher wird die Wärme aus der Umgebung aufgenommen und dem Kältemittel zugeführt. Das in dem Verdampfer einfließende Kältemittel besteht in der Regel aus einer Mischung von Flüssigkeit und Dampf. Bei der Wärmeübertragung erhöht sich die Enthalpie bei konstantem Druck und konstanter Temperatur. Dadurch verdampft das Kältemittel, bis die zuzuführende Energie genügt, um einen gesättigten Zustand (Dampf) zu erreichen. Wenn das Kältemittel Sattdampf bei steigender Enthalpie bzw. Wärmeübertragung wird, steigt auch die Temperatur. Der Druck bleibt stets konstant.

5.3.2. Kompressor (Verdichter)

Der Kompressor dient in dem Kreisprozess dazu, das Kältemittel auf ein höheres Temperaturniveau zu bringen. Das Kältemittel wird mit Hilfe einer externen mechanischen Kraft sehr stark verdichtet. Diese Kraft kommt aus einem Drehmoment einer Antriebswelle durch einen verbundenen Motor, dessen elektrische Leistung direkt aus dem öffentlichen Stromnetz verbraucht wird. Der gesättigte Dampf wird nun bei konstanter Entropie komprimiert und erhitzt, damit das Kältemittel genügend Energie enthält, um eine nutzbare Wärmeübertragung zu ermöglichen. Der Kompressor verdichtet so lange, bis das gewünschte Temperaturniveau erreicht wird.

Zur Verdichtung stehen je nach Anwendungsbereich und Nutzungsart die unterschiedlichsten Verdichterkonstruktionen bzw. Kompressortechniken zur Verfügung. Folgende Kompressortypen und -bauarten werden am häufigsten in Wärmepumpenanlagen eingesetzt: Hubkolbenverdichter, Scrollverdichter und Rollkolbenverdichter. [C2]

Es muss auch berücksichtigt werden, welche Bauform eingesetzt werden kann. Es können je nach Anwendungsfall und Einsatzbedingungen drei verschiedene Bauformen von Verdichtern zum Einsatz kommen:

Hermetischer Kompressor: Motor und Verdichter bilden eine Einheit. Diese sind zusammen in einem vollverschweißten Gehäuse installiert. Dies hat bei einem Defekt den Nachteil, dass der ganze Verdichter ersetzt werden muss.

Halbhermetischer Kompressor: Motor und Verdichter bilden ebenfalls eine Einheit (im Gegensatz zu hermetischen Kompressoren). Bei einem Defekt kann das Gehäuse demontiert und repariert werden.

Offener Kompressor: Motor und Verdichter sind voneinander getrennt. Die Antriebswelle des Verdichters wird aus dem Gehäuse geführt und mit dem Antriebsmotor direkt gekuppelt.[2]

5.3.3. Drosselventil

Das Kältemittel fließt aus dem Kondensator mit einer sehr hohen Temperatur und dem höchsten Druck durch das Drosselventil. In diesem Bauteil wird es durch die Drosselung expandiert und gekühlt. Das Kältemittel wird im Idealfall bei konstanter Enthalpie von einer gesättigten flüssigen Form auf einen gemischtförmigen (Dampf und Flüssigkeit) Zustand gebracht. Das heißt, dass das Kältemittel wieder in den Verdampfer einfließen kann und fähig ist, ob des niedrigen Drucks und niedriger Temperatur, Wärme aus der Umgebung aufzunehmen. Der Kreisprozess kann nun von neuem beginnen.

Der Drosselventil ermöglicht auch die Strömungssteuerung des Kältemittels innerhalb des Kreislaufs und ist abhängig von dem Wärmebedarf des Gebäudes.[C3]

4-Wege-Umschaltventil: Die Luft/Wasser-Wärmepumpe hat den Nachteil, dass ihr Verdampfer in der Außenumgebung bleibt und wegen des Wärmeenergieentzugs und der Feuchtigkeit in der Luft zu einer Vereisung führen kann. Diese Art von Ventil kann den Kältekreislauf umdrehen und leitet so das gasförmige Kältemittel vom Kompressor zum Verdampfer, wenn es abgetaut wird. Das 4-Wege-Umschaltventil ermöglicht die Verwendung der Wärmepumpe sowohl als Heizungsanlage als auch als Klimaanlage, wenn das Ventil umgeschaltet und die Richtung des Kreislaufes umgedreht wird.

5.3.4. Kältemittel

Das Kältemittel ist definiert als Energieträger, der in dem Kreisprozess einer Wärmepumpeanlage eingesetzt wird. Es sind Stoffe, die bei niedriger Temperatur und niedrigem Druck, Wärme aufnehmen und bei höherer

Temperatur und höherem Druck, Wärme abgeben können. Bei diesen Prozessen finden Zustandsänderungen des Fluids statt. 6].

Heute sind nur chlorfreie Kältemittel zugelassen. Diese enthalten keinerlei ozonschädigende Wirkung. Um ein Kältemittel in einer Kälteanlage einzusetzen, muss immer darauf geachtet werden, dass es ungiftig, biologisch abbaubar und nicht brennbar ist. Darüber hinaus haben die Kältemittel einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpeanlage, weil hohe Vorlaufstemperaturen je nach Kältemittel erreicht werden können. Die Kältemittel, die in dieser Arbeit betrachtet werden, sind R134a, R22 sowie NH₃. [4][C4][H2]

R134a (Tetrafluorethan): R134a ist das gebräuchlichste Kältemittel. Es ist ein farbloses und fast geruchloses Gas, welches durch Druck leicht verflüssigt werden kann. Dieses Kältemittel hat keine negative Auswirkung auf die Ozonschicht und nur einen geringen Einfluss auf den Treibhauseffekt. Heutzutage darf dieses Gas als Ersatz zu R12 oder R22 für Klimaanlage genutzt werden. R134a hat keine spezifische Wirkung auf den menschlichen Organismus. Der Dampf von R134a ist schwerer als Luft, sodass in Bodennähe höhere Konzentrationen auftreten können.

R22 (Chlordifluormethan): Dieses Gas wurde früher am häufigsten als Kältemittel in Wärmepumpenanlage eingesetzt, aufgrund seines niedrigen Siedepunktes und seiner hohen volumetrischen Kälteleistung für die Erzeugung tiefer Temperaturen. Wenn Partikel dieses Stoffs an die Außenluft gelangen, können Schäden in der Ozonschicht entstehen. Daher wurde der Einsatz von R22 verboten. Für die Betrachtung, Modellierung und Simulation einer Wärmepumpeanlage wird der Einsatz des Kältemittels für diese Arbeit verwendet. Da viele andere Kältemittel mit ähnlichen Eigenschaften eingesetzt werden, können die Ergebnisse der Simulation von Nutzen sein.

Die toxikologischen Eigenschaften von R22 wurden sehr gründlich untersucht. Es hat keine spezifische Wirkung auf den menschlichen Organismus. Das Kältemittel ist so gut wie geruchslos und auch für stark frequentierte Räumlichkeiten geeignet. [5]

Ammoniak (NH₃): NH₃ wird für große Kälteanlagen verwendet und besitzt kein Ozonzerstörungs- und kein Treibhauspotential, da seine atmosphärische Lebensdauer sehr kurz ist und bei ca. 7 bis 14 Tage liegt; das heißt, es trägt nicht zum direkten globalen Treibhauseffekt bei. Ein Vorteil dieses Kältemittels ist, dass es den geringsten Primärenergieaufwand zur Erzeugung einer Kälteleistung benötigt. Ammoniak ist ein farbloses, giftiges Gas und schwer entzündbar.

Darüberhinaus ist es circa 1,7mal leichter als Luft, das heißt, das Gas steigt sehr schnell auf und lässt sich über das Dach abführen. Reines Ammoniak weist gegenüber allen Lebewesen eine hohe Toxizität auf, aber hat durch seinen stechenden Geruch eine sehr gute Warnwirkung. Im Vergleich mit anderen Kältemitteln hat es einen hohen Wärmeleit- und Wärmeübergangskoeffizienten, niedrige Viskosität und niedrige Druckverluste.[5]

Die relevante Eigenschaften der betrachteten Kältemittel				
Kältemittel	Dichte	Schmelzpunkt	Siedepunkt	Treibhauspotential nach IPCC IV und F-Gase- Verordnung EU 517/2014
R134	1,21 g·cm ⁻³ (25 °C)	-101 °C	-26°C	1430 CO ₂ / kg
R22	3,93 kg·m ⁻³ (0 °C)	-160°C	-40,9°C	1810 CO ₂ / kg.
Ammoniak	0,771 kg·m ⁻³ (0 °C/1013 mbar)	-77,7 °C	-33 °C	Null

Tabelle 7. Eigenschaften der Kältemittel

5.3.5. Schallschutzmassnahme

Bei der Wärmepumpe im Allgemeinen und der Luftwärmepumpe im Besonderen ist der Schalleistungspegel entscheidend, der in dB(Dezibel) gemessen wird. Da ein hoher Lärm bei der Verdichtung des Kältemittels und bei der Drehung des Motors entsteht, muss die Wärmepumpeanlage weitestgehend von der Außenwelt isoliert werden. Um den Schalldruck der Wärmepumpe, besser gesagt des Verdichters, zu mindern, haben die Hersteller eine Vielzahl von Luft- und Körperschallentkoppelnden Systemen entwickelt.[15]

5.4. Funktionsweise einer Kompressionswärmepumpe

Die Funktionsweise einer Kompressionswärmepumpen basiert auf einem mechanisch betriebenen Kompressor der an einem Elektromotor angeschlossen ist. Sie arbeitet mit den folgenden Hauptbauteilen und nach dem folgenden Kreislauf-Prinzip. Abb. 7 zeigt den Kreissprozess detaillierter:[D]:

4 → 1 Verdampfer (Wärmeüberträger): Aufnahme der Verdampfungswärme mit Hilfe der Umweltenergie. Das Kältemittel wird bei konstanten und niedrigem Druck von einem gemischtformigen (flüssig und gasförmig) Zustand in einem rein gasförmigen Zustand gebracht. Schliesslich wird es bei konstanter Temperatur als Gas vorliegen.

1 → 2 Verdichter (Kompressor): In dieser Prozessstufe des Kreislaufs wird das Kältemittel komprimiert und erhitzt, dadurch wird Kompressionsarbeit geleistet und ein Temperaturanstieg des Gases bewirkt.

2 → 3 Verflüssiger (Wärmetauscher): In dieser Prozessstufe wird das erwärmte Gas wieder bis zur Verflüssigungstemperatur abgekühlt, dabei wird die gespeicherte Wärme aus der Umgebung abgegeben und das Kältemittel nimmt wieder seinen ursprünglichen flüssigen Zustand an.

3 → 4 Ventil (Drosselung): In der letzten Prozessstufe wird das Kältemittel durch die Drosselung des Drucks weiter abgekühlt. Somit wird eine Volumenvergrößerung und die Verdampfungstemperatur erreicht, die unter der Umgebungstemperatur liegt. Das Nassdampfgebiet wird wieder erreicht und damit kann der Kreisprozess wieder von vorn anfangen.

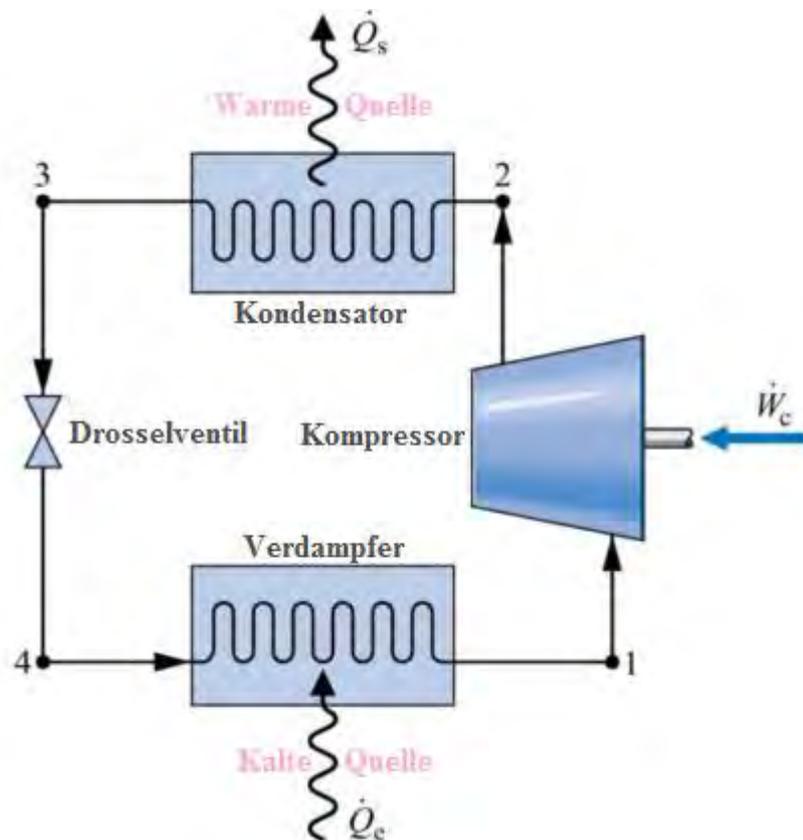


Abb. 7. Funktionsschema des Wärmepumpenkreisprozesses

Das folgende Druck-Enthalpie-Diagramm zeigt den Verlauf des Kältemittels und die Zustandsänderung im Bezug auf die Enthalpie (x-Achse) und den Druck (y-Achse) während des Kreisprozesses.

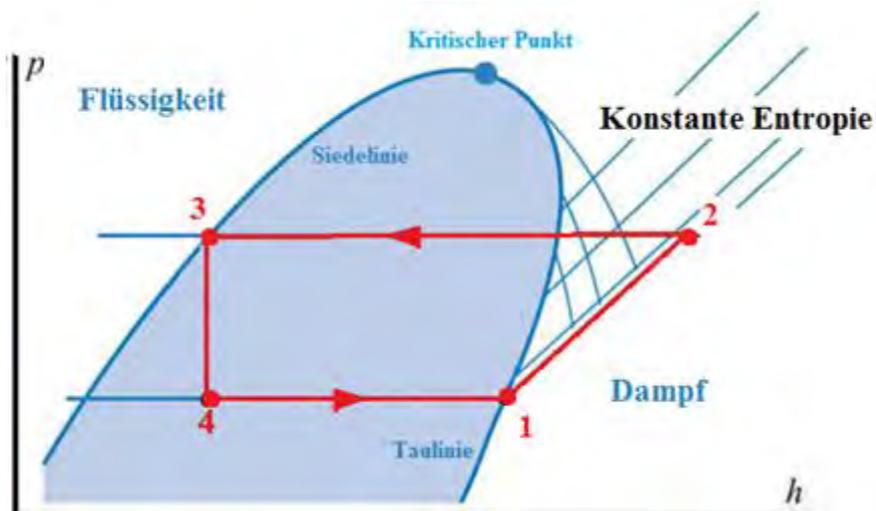


Abb. 8. Darstellung des Kältemittelprozesses auf dem Druck- Enthalpie-Diagramm

Für einen normalen Heizbetrieb gilt der rote eingezeichnete Kreisprozess auf dem Diagramm (Abb. 8), der nur bei idealen Bedingungen funktioniert, aber es gelten zwei extra Prozesse die für die betrachtende Wärmepumpe nicht berücksichtigt werden müssen. Diese zwei Prozessstufen heißen Unterkühlung (Punkt 3*) und Überhitzung (Punkt 2*) und werden in Abb. 9 dargestellt.

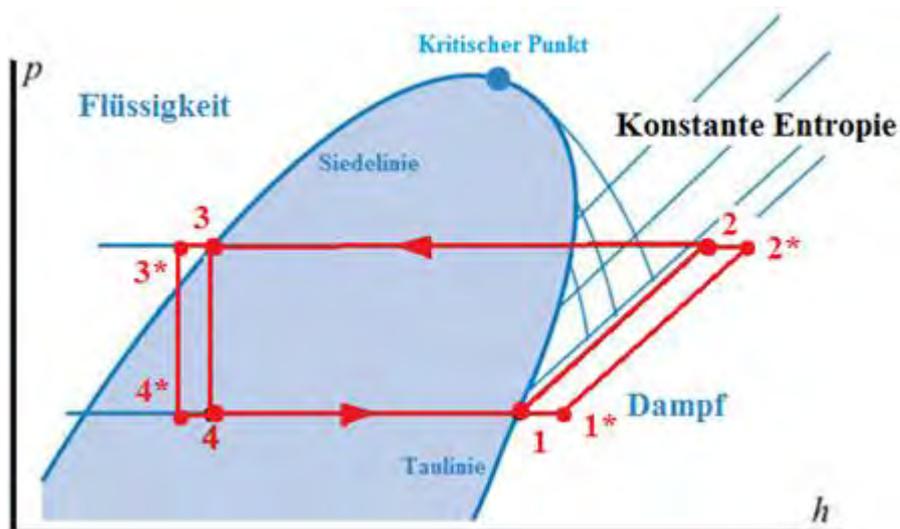


Abb. 9. Darstellung der Unterkühlung und der Überhitzung

3 → 3* Die Unterkühlung ist eine Prozessstufe, die nach dem Verflüssigen stattfindet. Es handelt sich um eine extra Wärmeabgabe bei konstantem Druck aber sinkender Temperatur, da sich der Aggregatzustand bereits geändert hat. Diese Prozessstufe vermeidet Dampfblasen vor dem Expansionsventil, weil es vorkommen kann, dass ein Teil der Wärme nicht übertragen und das Kältemittel nicht komplett kondensiert wird. Was ein negativer Beitrag ist, weil Dampfblasen die Leistung des Expansionsventils herabsetzen und die Flüssigkeitszufuhr zum Verdampfer reduzieren.

1 → 1* Die Überhitzung findet nach dem Verdampfer und vor dem Verdichter statt. Diese Prozessstufe basiert auf einer Erhitzung des Kältemittels um einen rein gasförmigen Zustand des Kältemittels zu gewährleisten. Der Grund, aus welchem diese Prozessstufe stattfinden sollte, basiert darauf, einen Flüssigkeitsdurchlauf zum Verdichter zu vermeiden, denn Flüssigkeitsschläge in der Rohrleitung zwischen Verdampfer und Verdichter verhindern den Durchfluss des Dampfes. Dies birgt die Gefahr eines Verdichtersausfalls, welcher Mechanische Überlastung und einen Bruch von Arbeitsventilen und beweglichen Teilen zur Folge hat, da der Verdichter flüssiges Kältemittel nicht auf dieselbe Weise wie gasförmiges Kältemittel komprimieren kann.

5.5. Berechnung der Parameter eines Wärmepumpensystems

5.5.1. Energie- und Massenbilanz

Die Berechnung der Parameter für eine mathematische Modellierung einer Wärmepumpe basiert auf einem thermodynamischen geschlossenen Kreisprozess eines Fluids. Dies erfüllt den ersten Hauptsatz der Thermodynamik. In diesem ist die Änderung der inneren Energie gleich der Summe der Änderung der Wärme und der Arbeit. Somit lässt sich der Energieerhaltungssatz beschreiben.[\[L\]](#)

$$dE = \delta Q + \delta W \quad (9)$$

Bei der obigen Formel ist dE die Änderung der gesamten Energie zwischen Eingang (E_i) und Ausgang (E_o) eines geschlossenen Systems.

$$dE = E_o - E_i \quad (10)$$

Die Energie (E) beinhaltet die kinetische (KE), potentielle (PE) und innere (U) Energie für den jeweiligen Eingangs- bzw. Ausgangszustand.

$$E = KE + PE + U \rightarrow \Delta E = \Delta KE + \Delta PE + \Delta U \quad (11)$$

Die Formel 9 kann mit der Formel 11 ersetzt und als Differenzialgleichung formuliert werden. Dabei wird berücksichtigt, welche Energie positiv oder negativ gezeichnet ist, das heisst, ob die Energie in das System eintritt (-) oder aus dem System austritt (+). Vor der Arbeitsdifferenz (δW) wird ein Negativzeichen gelegt, weil diese Arbeit eine externe Energie in das System einleitet und vor der Wärmedifferenz (δQ) ist ein Positivzeichen weil die Wärme eine Energie ist, die aus dem System transferiert wird.

$$dE = +\delta Q - \delta W \rightarrow \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{Q}{\Delta t} - \frac{W}{\Delta t} \rightarrow \frac{dE}{dt} = \frac{Q}{dt} - \frac{W}{dt}$$

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dKE}{dt} + \frac{dPE}{dt} + \frac{dU}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (12)$$

31

- ❖ Die kinetische, potentielle und innere Energie können wie folgt beschrieben werden:

$$\frac{dKE}{dt} = \frac{1}{2} \cdot (\dot{m}_o \cdot v_o^2 - \dot{m}_i \cdot v_i^2) \quad (13)$$

$$\frac{dPE}{dt} = g \cdot (\dot{m}_o \cdot z_o - \dot{m}_i \cdot z_i) \quad (14)$$

$$\frac{dU}{dt} = \dot{m}_o \cdot u_o - \dot{m}_i \cdot u_i \quad (15)$$

- \dot{m}_i und \dot{m}_o = Massenströme am Eingang und Ausgang des Systems (kg/s)
- v_i und v_o = Geschwindigkeit des Fluids am Eingang und Ausgang des Systems (m/s)
- z_o und z_i = Höhe des Fluids am Eingang und Ausgang des Systems (m)
- g = Gravitationsbeschleunigung (m/s^2)
- u_i und u_o = spezifische innere Energien Eingang und Ausgang des Systems (kJ/kg)

- ❖ Der gesamte Arbeitstrom ist die Summe aus der Arbeitsdifferenz des Fluids am Eingang und Ausgang des Systems und der externen Arbeit:

$$\dot{W} = \dot{W}_T = \dot{W}_c + \dot{W}_o - \dot{W}_i \quad (16)$$

- \dot{W}_c = Steht für die externe zugeführte Arbeit
- $\dot{W}_o - \dot{W}_i$ = steht Für die Kompression eines Fluides, ist die Arbeitsdifferenz des Prozesses zwischen Eingang und Ausgang hängt von dem Druck und dem Volumen ab und lässt sich wie folgt berechnen:

Die Kompressionsarbeitsänderung eines Fluids in einem geschlossenen System lässt sich durch den Integral zwischen der Volumenänderung in Funktion ihres Drucks berechnen:

$$\Delta W = W_o - W_i = \int_{V_i}^{V_o} P \cdot dV = P_o \cdot V_o - P_i \cdot V_i \quad (17)$$

In Funktion der Zeit als Arbeitstrom und mit dem Ersatz des Volumens für den Massenstrom und die Dichte kann die Formel wie folgt dargestellt werden:

$$\dot{W}_o - \dot{W}_i = P_o \cdot \dot{V}_o - P_i \cdot \dot{V}_i = P_o \cdot \frac{\dot{m}_o}{\rho_o} - P_i \cdot \frac{\dot{m}_i}{\rho_i} = P_o \cdot \dot{m}_o \cdot \vartheta - P_i \cdot \dot{m}_i \cdot \vartheta$$

$$\Delta \dot{W} = \dot{W}_o - \dot{W}_i = P_o \cdot \dot{m}_o \cdot \vartheta - P_i \cdot \dot{m}_i \cdot \vartheta \quad (18)$$

32

- \dot{W}_i und \dot{W}_o = Arbeitsströme am Eingang und Ausgang des Systems (kW)
- P_i und P_o = Druck des Fluids am Eingagn und Ausgang des Systems ($kg/s^2 \cdot m$)
- V_i und V_o = Volumen des Fluids am Eingagn und Ausgang des Systems (m^3)
- ρ_i und ρ_o = Dichte des Fluids am Eingang und Ausgang des Systems (kg/m^3)
- $\vartheta = \frac{1}{\rho_i} = \frac{1}{\rho_o}$ = Volumen in Funktion der Masse (m^3/kg)

Die Formel 16 kann nun mit der Formel 18 ersetzt werden um die folgende Formel zu bekommen:

$$\dot{W}_T = \dot{W}_c + P_o \cdot \vartheta \cdot \dot{m}_o - P_i \cdot \vartheta \cdot \dot{m}_i \quad (19)$$

Da die Enthalpie den Energieaufwand von Phasenumwandlungen eines Fluids beschreiben kann, ist sie eine sehr wichtige Grösse für die Berechnung der

Wärmepumpe. Weswegen sie berücksichtigt und in den Gleichungen ersetzt wird. Die spezifische Enthalpie ist die Summe der spezifischen inneren Energie und das Produkt von Druck und Volumen geteilt durch die Masse des Fluids. [C5]

$$h = u + p \cdot \vartheta \rightarrow p \cdot \vartheta = h - u \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (20)$$

Jetzt wird die Enthalpie in die Formel 19 ersetzt:

$$\dot{W}_T = \dot{W}_c + (h_o - u_o) \cdot \dot{m}_o - (h_i - u_i) \cdot \dot{m}_i \quad (21)$$

Folglich kann eine Formel für alle Energieänderungen wie folgt dargestellt werden (Formel 22):

$$\frac{dKE}{dt} + \frac{dPE}{dt} + \frac{dU}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}_T$$

$$\frac{1}{2} \cdot (\dot{m}_o \cdot v_o^2 - \dot{m}_i \cdot v_i^2) + g \cdot (\dot{m}_o \cdot z_o - \dot{m}_i \cdot z_i) + \dot{m}_o \cdot u_o - \dot{m}_i \cdot u_i = \dot{Q} - [\dot{W}_c + (h_o - u_o) \cdot \dot{m}_o - (h_i - u_i) \cdot \dot{m}_i] \quad (22)$$

Damit der erste Hauptsatz der Thermodynamik in dem zu betrachtenden Wärmepumpensystem erfüllt wird, muss eine Energie- und Massenbilanz aufgestellt werden. Formel 23 stellt die Massenbilanz dar:

$$\frac{dm}{dt} = \sum_i \dot{m}_i - \sum_o \dot{m}_o = 0 \rightarrow \sum_i \dot{m}_i = \sum_o \dot{m}_o$$

$$\dot{m}_i = \dot{m}_o = \dot{m} \quad (23)$$

Die Formel 24 wird schliesslich die gesamte Energie- und Massenbilanz für das zu betrachtende System darstellen:

$$\frac{dE_c}{dt} = 0 = \dot{Q}_c - \dot{W}_c + \dot{m} \cdot \left[(h_i - h_o) + \left(\frac{v_i^2 - v_o^2}{2} \right) + g \cdot (z_i - z_o) \right] \quad (24)$$

In dem vorigen Kapitel wurden die verschiedenen Bauteile einer Wärmepumpe erläutert. Jedes Bauteil verhält sich einzel wie ein stationäres geschlossenes System. Abb. 7 stellt den Kreisprozess in Vier Prozessstufe dar (siehe Kap. 5.4), die mit Hilfe der Formel 24 die Berechnung der einzelnen Bauteile ermöglicht. Man spricht von: [L1]

Verdichter: In diesem System wird eine Arbeit zugeführt um den Druck des Kältemittels zu erhöhen. Ausserdem werden irrelevante und sehr geringe Wärmeverluste, kinetische und - potentielle Energieänderungen mit der Umgebung entstehen.

- $\dot{W}_c = -\dot{W}_k \rightarrow$ Antriebsleistung des Kompressors (Negativzeichnen weil die Arbeit dem System zugeführt wird)
- $\dot{Q}_c = 0 \rightarrow$ Adiabatischer Prozess
- $\left(\frac{v_i^2 - v_o^2}{2}\right) + g \cdot (z_i - z_o) = 0 \rightarrow$ Keine Energieverluste
- $h_i = h_1 \rightarrow$ Eingangsenthalpie des Verdichters ist die Enthalpie auf dem Punkt 1 des Kreissprozesses
- $h_o = h_2 \rightarrow$ Ausgangsenthalpie des Verdichters ist die Enthalpie auf dem Punkt 2 des Kreissprozesses

$$0 = 0 - (-\dot{W}_k) + \dot{m} \cdot [(h_1 - h_2) + 0 + 0]$$

$$\dot{W}_k = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \quad (25)$$

Drosselventil: In diesem Gerät wird weder eine Arbeit zugeführt noch eine Wärme übertragen. Es handelt sich nun um einen adiabatischen Prozess, bei dem keine Wärmeverluste und Energieänderung entstehen.

- $\dot{W}_c = 0 \rightarrow$ Keine zugeführte Energie
- $\dot{Q}_c = 0 \rightarrow$ Adiabatischer Prozess
- $\left(\frac{v_i^2 - v_o^2}{2}\right) + g \cdot (z_i - z_o) = 0 \rightarrow$ Keine Energieverluste
- $h_i = h_3 \rightarrow$ Eingangsenthalpie des Drosselventils ist die Enthalpie auf dem Punkt 3 des Kreissprozesses
- $h_o = h_4 \rightarrow$ Ausgangsenthalpie des Drosselventils ist die Enthalpie auf dem Punkt 4 des Kreissprozesses

$$0 = 0 - 0 + \dot{m} \cdot [(h_3 - h_4) + 0 + 0]$$

$$0 = \dot{m} \cdot (h_3 - h_4) \rightarrow h_3 = h_4 \quad (26)$$

Wärmetauscher: Bei den Wärmetauschern wird zwar keine Arbeit zugeführt aber es wird Wärme übertragen. Es ist zwar kein adiabatischer Prozess aber es finden bei einem isoliertem System keine Energieverluste statt.

- $\dot{W}_c = 0 \rightarrow$ Keine zugeführte Energie
- $\left(\frac{v_i^2 - v_o^2}{2}\right) + g \cdot (z_i - z_o) = 0 \rightarrow$ Keine Energieverluste

$$0 = \dot{Q}_c - 0 + \dot{m} \cdot [(h_i - h_o) + 0 + 0]$$

$$\dot{Q}_c = \dot{m} \cdot (h_o - h_i) \quad (27)$$

Bei dem Verdampfer:

- $\dot{Q}_c = \dot{Q}_e \rightarrow$ zugeführte Wärme aus der Umgebung
- $h_i = h_4 \rightarrow$ Eingangsenthalpie des Verdampfers ist die Enthalpie auf dem Punkt 4 des Kreissprozesses
- $h_o = h_1 \rightarrow$ Ausgangsenthalpie des Verdampfers ist die Enthalpie auf dem Punkt 1 des Kreissprozesses

$$\dot{Q}_e = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) \quad (28)$$

Bei dem Kondensator:

- $\dot{Q}_c = \dot{Q}_s \rightarrow$ abgegebene Wärme in den Raum (Wärmebedarf)
- $h_i = h_2 \rightarrow$ Eingangsenthalpie des Kondensators ist die Enthalpie auf dem Punkt 2 des Kreissprozesses
- $h_o = h_3 \rightarrow$ Ausgangsenthalpie des Kondensators ist die Enthalpie auf dem Punkt 3 des Kreissprozesses

$$\dot{Q}_s = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) \quad (29)$$

5.5.2. Mollier-Diagramm

Um den Verlauf des Kältemittels darzustellen, wird das Mollier-Diagramm verwendet. Mit dem Mollier-Diagramm können Energie-Umsetzungen und Phasen- übergänge des Kältemittels im gesamten Wärmepumpenkreislauf quantitativ beschrieben werden. Bei dem Diagramm können mit Genauigkeit die Temperatur, der Druck und die Enthalpie des Kältemittels im Verlauf des Prozesses eingezeichnet werden. Das Mollier- Diagramm ermöglicht es, Zustandsänderungen des Kältemittels durch Erwärmung, Befeuchtung, Entfeuchtung, Kühlung und Mischung darzustellen. Es werden verschiedene Linien und Kurven eingezeichnet, die die Entropie, das spezifische Volumen und die Qualität des Nassdampfs darstellen. Ausserdem wird es sehr gut verdeutlicht, in welchem Bereich das Fluid sein Aggregatzustand ändert. Abb. 10 zeigt schematisch einen vollständigen Wärmepumpenkreislauf auf. Auf der vertikalen, logarithmisch geteilten Achse ist der Druck in bar aufgetragen; auf der horizontalen Achse kann die spezifische Enthalpie h (in kJ/kg) abgelesen

werden, die auf die Kältemittelmenge bezogen ist. Energie-Umsetzungen, das heisst, sowohl Wärmemengen als auch Verdichtungsarbeit und Drosselung, sind in dieser Darstellung als Strecken jeweils parallel zur Enthalpieachse und Vertikal zur Druckachse abzulesen. [4] [6]

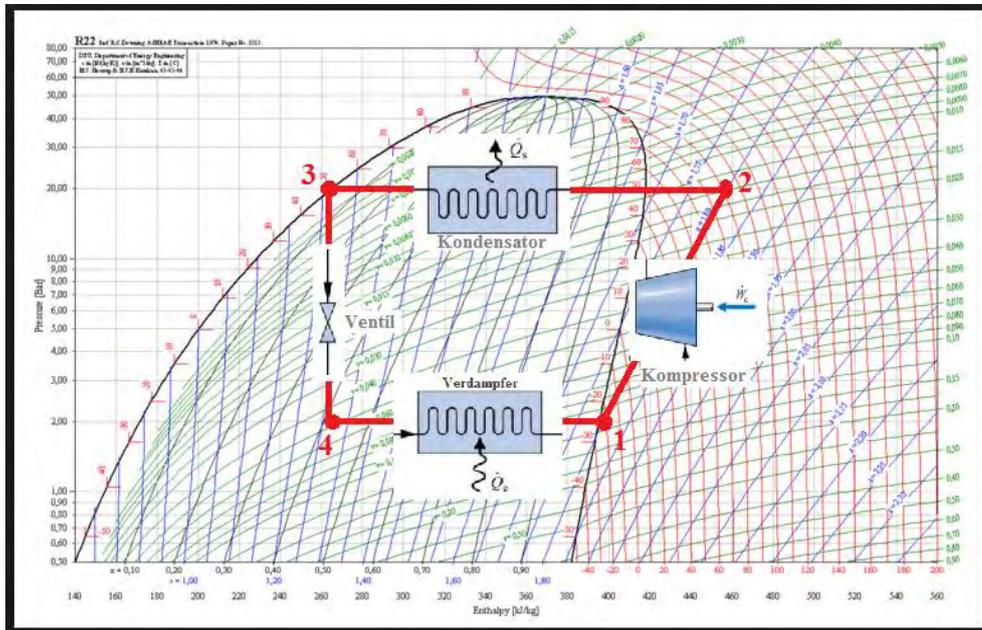


Abb. 10. Kältemittelsverfahren auf dem Mollier-Diagramm

Isobare und isenthalpe Linien: Auf der Y-Achse (rot eingezeichnet) wird der Druck in einer logarithmischen Skala repräsentiert. Auf der X-Achse werden Verschiedene Grössen repräsentiert, aber nur die senkrechte vertikale Linien sind dafür, um die Enthalpie (grün eingezeichnet) darzustellen.

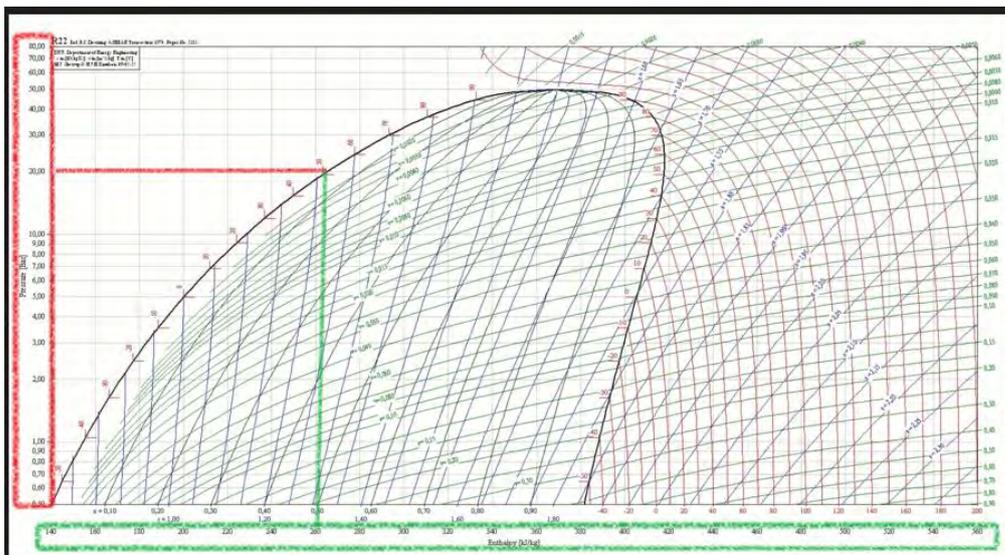


Abb. 11. Isobare und isenthalpe Linien auf dem Mollier-Diagramm

Sättigungslinien: Die grosse Kurve in der Mitte trennt das flüssige- und den gasförmigen Bereich von dem gemischtförmigen Bereich ab. Wie in Abb. 12 dargestellt ist, ist der linke Bereich ausserhalb der Siedelinie, der gekühlte Bereich bzw. das Flüssigkeitsgebiet, in dem die Temperatur des Fluids kleiner als die Sättigungstemperatur ist. Auf der rechten Seite des Diagramms mit der Taulinie getrennt, befindet sich das Heizdampfgebiet. In diesem Bereich ist das Kältemittel erhitzt und hat immer einen rein gasförmigen Zustand. Unter der Kurve befindet sich das Nassdampfgebiet. Innerhalb dieser Kurve hat das Kältemittel einen gemischtförmigen Zustand, weil der Aggregatzustand des Fluids sich ändert.

Die Siede- und Taulinie (schwarz eingezeichnet) stellen jeweils den gesättigten flüssigen und -gasförmigen Zustand des Fluids dar. Der höchste Punkt der verbundenen Sättigungslinien wird als kritischer Punkt bezeichnet. Ab diesem Punkt findet selbst nach weiterer Erhöhung des Druckes keine Kondensation statt und das kritische Temperaturniveau wird erreicht. Ab dieser Temperatur kann das Kältemittel weder kondensiert noch komprimiert werden. Diese Temperatur bezeichnet man als kritische Temperatur und wird in dem Mollier-Diagramm in Abb. 12 rot eingezeichnet. [6]

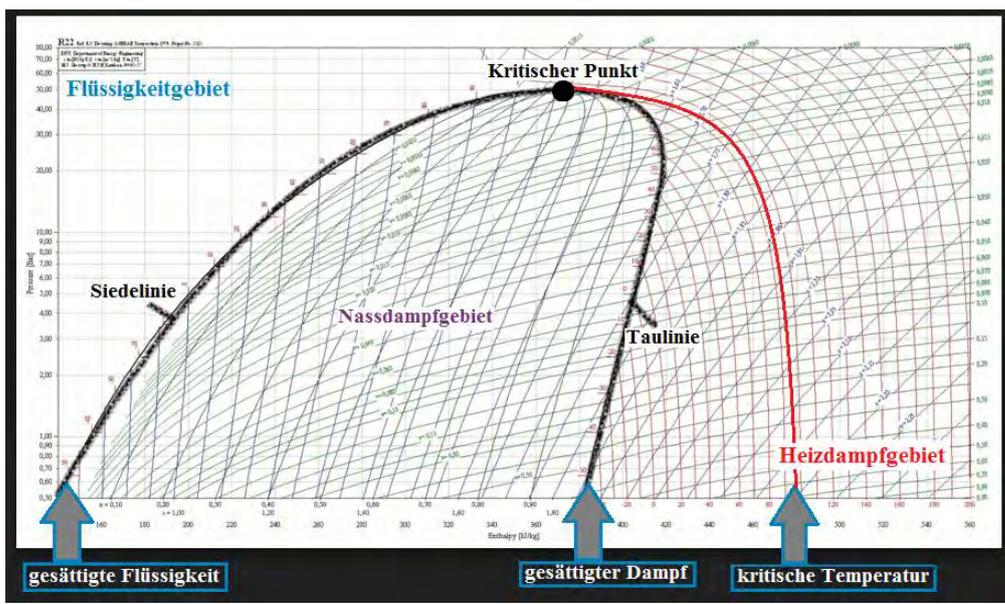


Abb. 12. Sättigungslinien und kritischer Punkt des Mollier-Diagramms

Temperaturlinien (Isotherme Linien): Die isothermen Linien, die die Temperatur des Fluids darstellen, werden auf der linken Seite des Diagramms, das heisst, in dem flüssigen Bereich senkrecht und parallel zu den Enthalpielinien eingezeichnet. In dem Nassdampfgebiet unter der Kurve werden diese isotherme Linien horizontal parallel zu den isobaren Linien dargestellt, da in diesem Bereich eine Aggregatzustandsänderung stattfindet und sowohl der

Druck als auch die Temperatur konstant bleibt. In dem Heizdampfgebiet des Diagramms nehmen die Temperaturlinien eine andere Richtung. Die Linien nähern sich in dem Heizdampfgebiet asymptotisch der negative Y-Achse. [6]

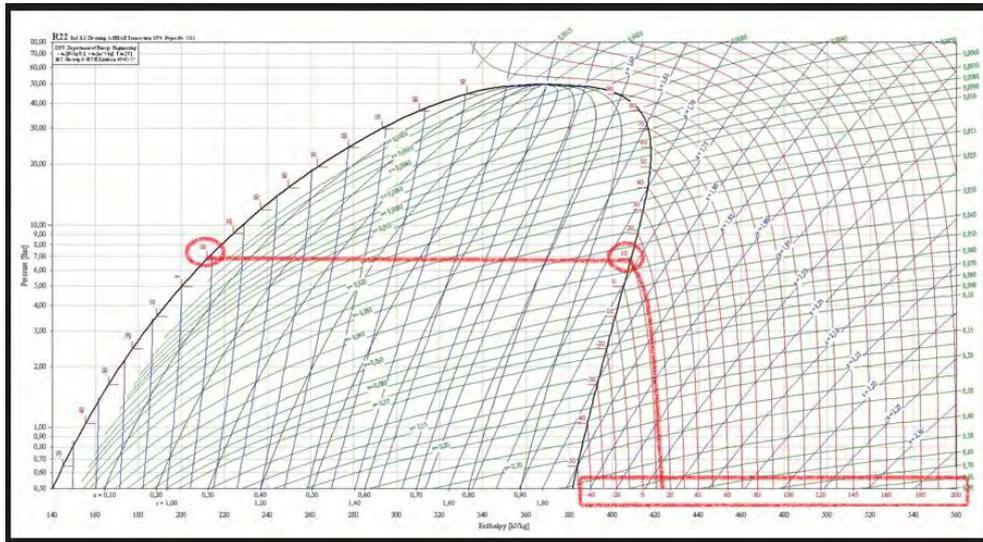


Abb.13. Isotherme Linien auf dem Mollier-Diagramm

Entropielinien (Isentrope Linien): Diese Linien können auf der rechten Seite des Diagramms deutlicher abgelesen werden und sind schräg von der X-Achse über die Taulinie gekennzeichnet. Diese Linien zeigen den Entropiewert des Kältemittels. Für einen isentropen Prozess wird das Kältemittel über der Entropielinie parallel steigen, bis es sein maximales Temperaturniveau erreicht. [6]

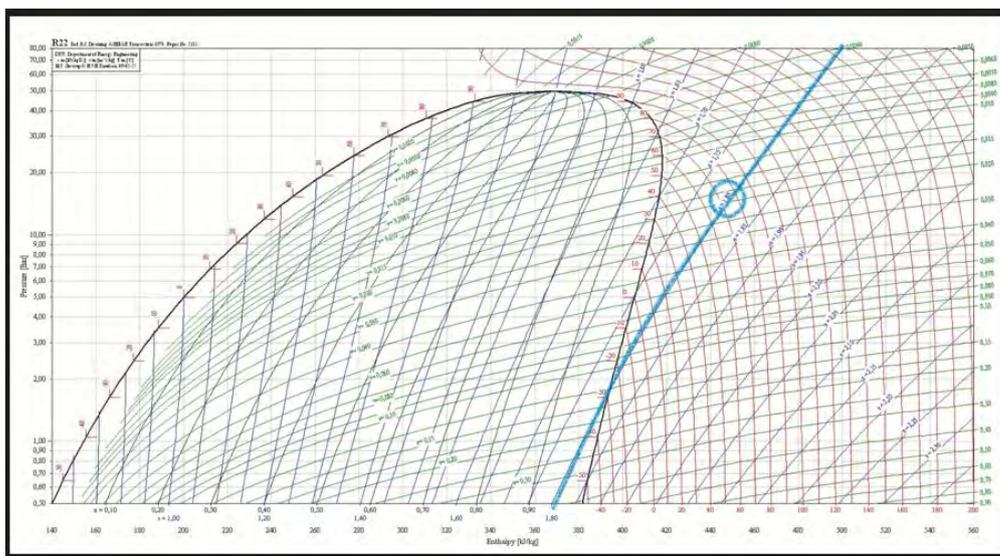


Abb.14. Isentrope Linien auf dem Mollier-Diagramm

5.5.3. Carnotscher Kreisprozess

Der Carnot-Kreisprozess ist ein reversibler Prozess, bei dem Wärme zwischen einer warmen Quelle und einer kalten Quellen umgesetzt wird. In der Realität lässt sich solch ein reversibler Prozess jedoch nicht verwirklichen. Trotzdem wird die thermodynamische Qualität von realen Wärmepumpen an dem so genannten Carnot-Wirkungsgrad gemessen. Der Carnot Prozess besteht aus zwei isothermen und isobaren, und zwei adiabatischen Zustandsänderungen; hierbei handelt es sich um adiabatische Prozesse bei dem Drosselventil und Verdichter, und um isotherme und isobare Prozesse bei Verdampfer und Verflüssiger. Dabei wird das Kältemittel als ideales Gas betrachtet und die Prozessführung als reversibel angenommen. Der Carnot Prozess ist ein Idealfall und schraenkt einen Maximalen erreichbaren Wirkungsgrad für eine thermische Maschine ein.

Carnotscher Kreisprozess		
Stufe	Massnahme	Bild
1	Durch Aufnahmen von Wärme erfolgt eine isotherme Expansion. Es wird die Arbeit verrichtet.	
2	Durch eine adiabatische Kompression wird die Temperatur erhöht. Dabei muss Arbeit zugeführt werden	
3	Für die isobare Kompression muss Arbeit zugeführt werden. Die dabei entstehende Wärme wird an die Umgebung abgegeben.	
4	Bei einer adiabatischen Expansion verringert sich die Temperatur. Hierbei wird von dem Gas Arbeit verrichtet, seine innere Energie verringert sich.	

Tabelle 8. Beschreibung eines geschlossenen Kreisprozesses nach Carnot

Carnotscher Wirkungsgrad: Der Carnotscher Wirkungsgrad hängt von den Aussen- und Innentemperaturen ab und ist von ihnen eingeschränkt, ausserdem gibt er an, welcher Anteil der aufgenommenen Wärme maximal in mechanische Arbeit umgewandelt werden kann. Für eine Wärmekraftmaschine muss mindestens so viel Wärmeenergie zugeführt werden, wie auch die ideale Carnot-Maschine benötigt um die Gewinnung von mechanischer Energie zu erreichen. [B2]

$$\eta_c = \frac{T_c}{T_c - T_F} \quad (30)$$

- T_F = Aussentemperatur oder Temperatur der kalten Quelle (°C).
- T_c = Innentemperatur oder Temperatur der warmen Quelle (°C). [C6]

Die zu betrachtende Wärmepumpe für kann annäherungsweise nach dem Carnot-Prozess modelliert werden. Die Prozessstufe um den dementsprechenden Kreisprozess darzustellen, lassen sich wie folgt beschreiben: [B3]

Bei der Verdichtung und der Drosselung werden keine Wärme mit der Umgebung ausgetauscht, es handelt sich allerdings um einen adiabatischen Prozess. Da sich Wärmeverluste praktisch nie vollständig verhindern lassen, ist der adiabatische Prozess eine Idealisierung. Er macht aber die Berechnung und Modellierung der Wärmepumpe einfacher und ermöglicht sie überhaupt erst. Somit sind diese zwei Prozesse als isentrop bezeichnet.

Der Verdampfer nimmt durch einen isothermen und isobaren Prozess Wärme von der Umgebung auf bis das Fluid den Punkt 1 erreicht (gesättigter Dampf).

Das Kältemittel wird dann in dem Verdichter komprimiert und auf eine reine Gasform gebracht und erhitzt. Dabei erfolgt ein adiabatischer und isentroper Prozess.

Durch einen isobaren Prozess verringert sich die Temperatur bis das Fluid einen gesättigten gasförmigen Zustand erreicht, ab dem Punkt wird Wärme an die Umgebung abgegeben und dabei verliert es durch den isothermen Prozess Energie in Form von Enthalpie.

Wenn das Kältemittel eine gesättigte Flüssigkeit (Punkt 3) wird, ist anzunehmen, dass die benötigte Wärme erfolgreich abgegeben worden ist. Dadurch kann das Fluid durch das Drosselventil expandiert und auf den ursprünglichen Zustand gebracht werden kann. Die Temperatur und Druck sinken adiabatisch.

Es wird vorausgesetzt, dass alle Prozessstufen des Kreislaufes reversibel sind, ausser der Prozessstufe 3 → 4, wo die Drosselung eine Vergrösserung des

Gasvolumens verursacht und dabei eine Entropiedifferenz entsteht. Jedoch werden weder die innere, die kinetische, die potentielle Energien noch die Wärmeverluste mit der Umgebung berücksichtigt. Die Druck-Enthalpie und Temperatur-Entropie Diagramme (Abb. 8 und 15) verdeutlichen dieses Verfahren.[G1]

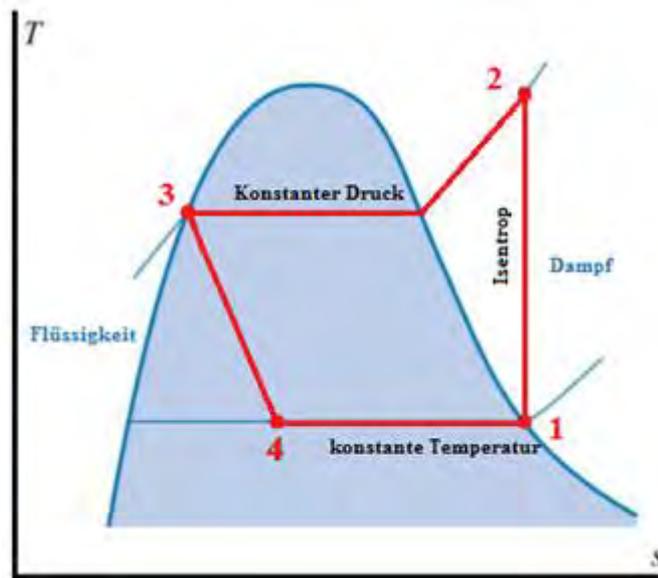


Abb.15. Temperatur-Entropie-Diagramm

5.6. Kennzahlen

5.6.1 COP-Wert

Der COP-Wert (Coefficient of Performance) ist das Verhältnis zwischen dem abgegebenen Nutzwärmestroms und des Stromverbrauch unter realen Bedingungen. Der Energieverbrauch der Hilfsgeräte (Umwälzpumpen, Ventilatoren u.a.) wird ebenfalls berücksichtigt. Er sagt aus, wie viel Wärmeleistung pro verbrauchter Stromleistung gewonnen wird.

Die abzugebende Wärme in der warme Quelle ist nun die Summe aus der aufzunehmenden Wärme von der kalten Quelle und der verbrauchten elektrischen Leistung.[L1]

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_F + \dot{W}_S \quad (31)$$

Der normierte COP-Wert sagt aus, wie viel Leistung von elektrischer Energie bereitgestellt werden muss, auf das benötigte Heizleistungsniveau zu kommen. Er lässt sich wie folgt berechnen:

$$COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}} \quad (32)$$

Der COP-Wert wird angegeben in der Form "Buchstabe °C Wert / Buchstabe °C Wert = COP Wert."

Beispiel wie ein COP-Wert angegeben wird: **B 0°C / W 35°C = 4.4**

- Erster Buchstabe: Art der Wärmequelle (B: Erdreich, W: Grundwasser, A: Aussenluft).
- Erste Zahl: Temperatur der kalten Quelle.
- Zweiter Buchstabe: Art der Wärmenutzungsanlage.
- Zweite Zahl: Raumtemperatur.

Manche Wärmepumpenanlage können sowohl zum Kühlen als auch zum Heizen verwendet werden, je nach Verwendung ergeben sich unterschiedliche COP-Werte.

Wenn die Wärmepumpe als Raumheizung genutzt wird, ist die abzugebende Wärme für den COP-Wert von Bedeutung:

$$COP_w = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{W}_S} = \frac{\dot{Q}_F + \dot{W}_S}{\dot{W}_S} \quad (33)$$

Jedoch ist die aufzunehmende Wärme für den COP-Wert von Bedeutung wenn die Wärmepumpe zum Kühlen gestellt wird:

$$COP_k = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{W}_S} \quad (34)$$

- COP_w = Coefficient of Performance für Heizarbeit
- COP_k = Coefficient of Performance für Kühlarbeit
- \dot{Q}_C = Leistung aus der warmen Quelle (W)
- \dot{Q}_F = Leistung aus der kalten Quelle (W)
- \dot{W}_S = zugeführte elektrische Leistung (W)

Der ideale COP-Wert wird nach dem Carnot-Wirkungsgrad berechnet, der von den Aussen- und Innerentemperatur abhängt:

$$\eta_{cop} = \frac{T_c}{T_c - T_F} \quad (35)$$

- T_F = Aussentemperatur oder Temperatur der kalten Quelle (°C).
- T_c = Innentemperatur oder Temperatur der warmen Quelle (°C).

T_F steht für die Temperatur der kalten Quelle, das heisst, der Ort aus dem die Wärme aufgenommen wird. Für eine Heizungsanlage ist dieser Ort die Weltumgebung (Erdreich, Grundwasser oder Aussenluft). Wenn die Wärmepumpe als Klimaanlage oder als Kühlanlage arbeitet, ist der zukühlende Raum die kalte Quelle und die Aussenumgebung die warme Quelle.

Eine Wärmepumpe mit einem Cop-Wert zwischen 3 und 5 arbeitet qualitativ wirtschaftlich gut. Waermepumpen mit einem COP-Wert unter 2 sind als ineffizient anzusehen. Das heisst, der Gewinn (die Wärme) muss mindestens den dreifachen Wert des Verbrauchs (die Stromleistung) in kW erreichen.

Ein Faktor, der die Qualität der Wärmepumpenanlage einschätzt, ist der Gütegrad. Dieser Wert ist das Verhältnis zwischen reellen COP-Werte und dem idealen Carnot-Wirkungsgrad, dieser Faktor zeigt an, wie weit ein reeller Prozess von dem idealen theoretischen Carnot-Prozess angenähert ist.[7]

$$\eta_G = \frac{COP}{\eta_{cop}} \quad (36)$$

5.6.2. Wirkungsgrad

Jedes technisches Gerät hat eine Grenze, an welche das maximale Nutzen im Verhältnis zur aufgewendeten Leistung steht. Die Effizienz einer Wärmepumpe wird nicht nur durch den COP-Wert und Gütewert bestimmt, sondern auch durch andere Faktoren. Eine der wichtigsten Kennzahlen ist der Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad oder auch Leistungszahl genannt gibt das Verhältnis von aufgenommener Energie zu abgegebener Heizleistung an. Im Gegensatz zum COP-Wert wird allerdings nicht der Energieverbrauch der Hilfsaggregate beachtet, da er die Leistungen aller angeschlossenen Geräte einbezieht und neben dem Wirkungsgrad ein entscheidender Indikator für die Qualität der Heizung ist. Die Leistungszahl wird umso größer, je kleiner die

Temperaturdifferenz zwischen Heizwassertemperatur und Wärmequellentemperatur ist. [B1]

$$\eta_L = \frac{\text{Nutzleistung}}{\text{Antriebsleistung}} = \frac{\dot{Q}_s}{\dot{W}_k} \quad (37)$$

- η_L = Wirkungsgrad für Heizen
- \dot{Q}_c = Wärmebedarf (W)
- \dot{W}_k = Elektrische Leistung des Kompressors (W)

5.6.3. Jahresarbeitszahl

Die Jahresarbeitszahl spiegelt das Verhältnis der geleisteten Heizarbeit zur aufgenommenen Antriebs- und Hilfsenergie in kWh der Wärmepumpe im Verlauf eines Jahres. Durch die Messung von Strom- und Wärmemengezähler, lässt sich die Jahresarbeitszahl (JAZ) als Leistungszahl ablesen.

44

Die JAZ ist eine der wichtigsten Kennzahlen einer Wärmepumpe da sie den Wirkungsgrad der Anlage beschreibt. Jedoch enthält sie Hilfsgeräte und den COP-Wert bei ihrer Berechnung. Weswegen sie als Anlagennutzungsgrad verstanden werden kann. Für die Wirtschaftlichkeit und damit Qualität der Wärmepumpe liegt die JAZ in einem Bereich zwischen 2,5 und 4. Das heißt, aus einem Teil Strom werden zwischen 2,5 und 4 Teilen Energie gewonnen. [D3]

$$JAZ_{\text{jahr}} = \frac{\sum \dot{Q}_{s_i}}{\sum \dot{W}_{k_i}} \quad (38)$$

- JAZ_{jahr} = Jahresarbeitszahl
- \dot{Q}_{c_i} = Abgegebener Wärmebedarf (W)
- \dot{W}_{k_i} = Elektrische Leistung des Kompressors (W)

6. Elektrisches Heizen

6.1. Wärmeübertragung

Die Elektroheizungen basieren prinzipiell auf einer Wärmeübertragung. Dabei lassen sich drei Arten unterscheiden: [C7]

Wärmeleitung oder Konduktion: Die Wärmeleitung ist ein Transportvorgang im molekularen Bereich, bei dem die Moleküle sich immer in Richtung geringerer Temperatur bewegen. Prinzipiell basiert es auf einer Übertragung durch einen Festkörper oder ein sehr ruhiges Fluid ohne entstehende Verluste. Die Wärmeübertragung durch Konduktion wird nach der ersten Fourierschen Gleichung berechnet:

$$\dot{Q}_{Lei} = A \cdot \frac{e}{\lambda} \cdot \Delta T \quad (39)$$

- \dot{Q}_{Lei} = Wärmestrom durch Wärmeleitung (kW)
- A = Wärmetausfläche (m^2)
- e = Wanddicke (m)
- λ = Wärmeleitfähigkeit (kW/m · K)
- ΔT = Temperaturdifferenz an dem Heizelement (°C)

Wärmestrahlung: Wärmestrahlung ist eine Energie, die von allen Festkörpern, Flüssigkeiten, Plasmen und genügend großen Gasmassen in Form einer elektromagnetischen Strahlung ermittelt wird. Im Gegensatz zur Konvektion und Konduktion ist es kein Übertragungsmedium notwendig, um Wärme durch Strahlung zu übertragen. Der von einem Körper abgestrahlte Wärmestrom kann nach dem Stefan-Boltzmann Gesetz ermittelt werden. Dieses besagt, dass jeder Körper, dessen Temperatur über dem Absoluten Nullpunkt (0 K) liegt, Wärmestrahlung an seine Umgebung abgibt und die thermisch abgestrahlte Leistung in Abhängigkeit von seiner Temperatur ist.

$$\dot{Q}_{st} = A \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_o^4 - T_i^4) \quad (40)$$

- \dot{Q}_{st} = Wärmestrom durch Strahlung (kW)
- A = Wärmetausfläche (m^2)
- ϵ = Emissionsgrad
- σ = Stefan-Boltzmann-konstante ($5.67 \cdot 10^{-11} \text{ kW}/m^2 \cdot K^4$)

- T_o = Aussentemperatur des Heizelementes ($^{\circ}\text{C}$)
- T_i = Innentemperatur des Heizelementes ($^{\circ}\text{C}$)

Konvektion: Die Wärmeübertragung mittels Konvektion erfolgt, wenn energiehaltigen Teilchen in der Strömung von Gasen oder Flüssigkeiten in Kontakt mit einem festen Körper mitgeführt werden. Bei der Konvektion werden zwei Mechanismen unterschieden. Erfolgt die natürliche Konvektion ohne forcierte Luftumwälzung, also ungezwungen, werden die sogenannten energiehaltigen Teilchen einzig zwischen dem festen Körper und den Flüssigkeiten oder Gasen aufgrund von Temperaturunterschieden transportiert. Im Gegensatz zur ungezwungenen Konvektion gibt es die forcierte oder erzwungene Konvektion. Es handelt sich dabei lediglich um eine Beschleunigung der Erwärmung. Man kann entweder die Temperatur erhöhen oder mithilfe eines Ventilators. Die Berechnung der Wärmeübertragung durch Konvektion lässt sich nach dem Newtonschen Abkühlungsgesetz beschreiben. Dieses Gesetz sagt aus, dass die Wärmedifferenz zwischen einem Festkörper und einem Fluid proportional zur Temperaturdifferenz zwischen beiden ist.

$$\dot{Q}_{ko} = A \cdot \alpha_k \cdot \Delta T \quad (41)$$

- \dot{Q}_{ko} = Wärmestrom durch Konvektion (kW)
- A = Wärmetausfläche (m^2)
- α_k = Wärmeübergangskoeffizient ($kW/m^2 \cdot K$)
- ΔT = Temperaturdifferenz an dem Heizelement ($^{\circ}\text{C}$)

Je nach Heizungsart kommen unterschiedliche Arten von Wärmeübertragung zum Einsatz. Es muss auch beachtet werden, dass die Größe und die Beschaffenheit des Gerätes eine wichtige Rolle für die Berechnung der nutzbaren übertragenen Wärme spielen. Diese Wärme muss den gesamten Wärmebedarf eines Wohnhauses abdecken. Zum Beispiel kann der Verbrauch einer Heizungsanlage, deren Wärmeübertragung durch Konvektion und Wärmestrahlung erfolgt, je nach Wärmeübergangskoeffizient, Strahlungsemissionskoeffizient und Fläche des Gerätes eingeschätzt werden. Dafür muss die Beschaffenheit des Materials in dem Heizgerät bekannt sein. Die Wärmeleistung muss mindestens genauso hoch wie der Wärmebedarfswert sein, damit sich der Einsatz einer dementsprechenden Heizungsanlage lohnt.

$$\dot{Q}_{max} = \dot{Q}_{ko} + \dot{Q}_{st} \geq \dot{Q}_s \text{ (Wärmebedarf)}$$

6.2. Prinzip der elektrischen Heizung

Das elektrische Heizen ist die zweite Koppelstelle, die wir betrachten werden. Die Funktionsweise einer Elektroheizung lässt sich nach dem ersten Jouleschen Gesetz beschreiben. Dieses Gesetz sagt aus, dass ein Leiter mit einem sehr hohen Widerstand sich erwärmt und Wärme freisetzt, wenn ein elektrischer Strom ihn durchfließt. Dabei stoßen die Elektronen auf Widerstand und ein gewisser Teil der elektrischen Energie wird nicht weiter als elektrischer Strom transportiert, sondern in thermische Energie umgewandelt und als Wärme nach außen abgegeben. Diese Wärme kann entweder direkt in den Raum abgegeben oder zuvor in einem Material bzw. einem Fluid gespeichert und dann erst nach und nach abgegeben werden.

Die gesamte elektrische Leistung einer elektrischen Heizung lässt sich mit einer angelegten Spannung (U) und dem Widerstand (R) der gesamten Heizungsanlage nach dem Ohmschen Gesetz berechnen:

$$P = U_s \cdot I = U_s \cdot \frac{U_s}{R} = \frac{U_s^2}{R} \text{ [kW]} \quad (42)$$

- P = Elektrische Leistung (kW)
- U_s = Angelegte Spannung (V)
- R = Widerstand des Heizgerätes (Ω)

Dieser Wert bemisst nahezu die ganze übertragende Wärme des Heizgerätes (siehe Kapitel 6.1) und muss die gesamte Heizlast des Wohnhauses abdecken.

6.3. Bauteile und Arten von elektrischen Heizungen

Die konventionelle elektrische Heizung besteht prinzipiell aus folgenden Bauteilen:

- Dem Heizleiter oder Widerstand, der direkt mit dem elektrischen Strom verbunden ist.
- bei einigen Fällen Schamottekern, das direkt an dem Leiter verbunden ist.
- Dem Stahlgehäuse.

- Der Abdeckung zur Wärmeleitung und Wärmestrahlung.

Je nach Verwendung und Übertragungsverfahren werden einige Elektroheizungen aus weiteren Bauteilen aufgebaut.[8]

Elektroheizgeräte werden für die Beheizung sehr großer Räume eingesetzt aber nur kurzzeitig. Die Zeltheizung, Bautrockner und Hallenheizungen sind typische Anwendungsbeispiele für das Heizen mit Strom im großen Stil. Für den kurzzeitige Einsätze in großen Räumen werden beispielsweise elektrische Heizkanonen, Heizstrahler und große Heizgebläse verwendet.[J2]

Die Verwendung von einer Elektroheizung hat den Nachteil, dass viel Strom verbraucht wird. Aber gegenüber gas- oder dieselbetriebenen Heizgeräten bieten strombetriebene Heizungen den Vorteil, dass sie weniger gesundheitsschädliche Abgase ausstoßen. Zudem entstehen bei der Wärmeerzeugung durch Direktheizgeräte kaum Energieverluste (siehe Kap.9).[i1]

Elektroheizungen finden breite Anwendung im Haushalt aber auch in vielen Prozessen in der Industrie. Dabei werden auch grundsätzlich verschiedene Heizverfahren, je nach Wärmeübertragungsart unterschieden: Lichtbogenerwärmung, Induktionserwärmung, dielektrische Erwärmung und Widerstandserwärmung.

Die Widerstandserwärmung ist vielleicht das gängigste Heizverfahren. Im Folgenden wird sie für die Elektroheizungen eines Haushaltes betrachtet. Dieses Verfahren erfolgt durch Energieumwandlung zwischen Elektrizität und Wärme durch einen Leiter. Diese Technologie lässt sich wiederum in zwei verschiedene Arten der Widerstandserwärmung unterscheiden:

Direkte Widerstandserwärmung: Dabei wird die Wärme nach der Erzeugung durch den elektrischen Strom zu dem zu beheizenden Objekt selbst geleitet.

Die indirekte Widerstandserwärmung: Bei der indirekten Widerstandserwärmung wird die erzeugte Wärme von den Heizleitern danach durch Strahlung oder Konduktion auf das zu beheizende Objekt übertragen. Heutzutage werden nur wenige Heizungsanlagen, die auf der direkten Widerstandserwärmung basieren, als Raumheizungen eingesetzt. Bei der indirekten Widerstandserwärmung lassen sich je nach Wärmeübertragung Direktheizgeräte und Speicherheizungen unterteilen. Speicherheizung werden im Kapitel sieben erläutert.

7. Nachtspeicher

7.1. Prinzip und Funktionsweise eines Nachtspeichers

Ein Nachtspeicherofen ist nichts anderes als eine elektrische, sogenannte Einzelspeicherheizung, die durch günstigeren Strom betrieben wird. Eine Einzelspeicherheizung hat die Größe einer normalen Heizungsanlage und hat die Besonderheit einen Speicherkern im Inneren zu besitzen. Die Funktion dieses Kerns ist es, Wärme aus dem öffentlichen Stromnetz aufzunehmen und zu speichern. Die Wärme entsteht in dem Heizelement, welches sie am darauffolgenden Tag abgibt. Wie viel Strom in der Nacht benötigt wird, ergibt sich aus der Restwärme, der Außentemperatur und der eingestellten Heiztemperatur.

Der Austritt der Wärme aus der Einzelspeicherheizung ist über ein Luftaustrittsgitter geregelt. Der Rest des Gerätes wird isoliert, damit die notwendige Wärme in den Raum gelangt. Wenn ein zusätzliches Gebläse diese Luft heraus bläst, kann ein Luftzug entstehen, der das Raumklima negativ beeinflusst und Staub überall im Raum verteilt. Die Montage eines Nachtspeicherofens ist eher unproblematisch, da nur die benötigten Stromkabel und die Heizkörper an der Wand angebracht werden müssen. [i4]

Aufladung: Der Nachtspeicherofen wird klassischerweise eingesetzt um Strom zu sparen. Der Anwender des Gerätes kann immer ungefähr zwischen 22.00 und 06.00 Uhr nachts den Nachtspeicher anschalten und dieser gibt die Wärme bis zur erneuten Aufladung am Abend über den Tag verteilt ab. Jedoch hängen die Aufladezeiten einer Nachtspeicheranlage von den Kostenverordnungen des Stromanbieters und der Bauart der Heizung ab und können andere Aufladezeiten je nach Tarifvertrag haben. Bei einem Nachtspeicherofen muss zuerst der Wärmebedarf des Folgetages ermittelt werden. Die Ermittlung des Tagesbedarfs erfolgt mittels eines Außentemperaturfühlers, der im Verlauf des Tages die Außentemperatur misst und die erforderliche Wärmemenge für den Folgetag abschätzt.

Das ist nur möglich durch eine Aufladesteuerung, die in einem Aufladeregler stattfindet. Eine andere Möglichkeit wäre, selbst die Wärme für den nächsten Tag zu kalkulieren und dann einzugeben, falls die vorausgesagte Temperatur des Folgetages sehr verschieden zum vergehenden Tag ist. Plötzliche Temperaturwechsel werden mit einer einfachen Steuerung nicht berücksichtigt. [12]

Für die Aufladung des Nachtspeicherofens gilt die folgende Formel:

$$\text{Aufladung} = \frac{24 \cdot \dot{Q}_s \cdot (T_{nc} - T_{med}) \cdot \alpha}{(T_c - T_F) \cdot t_L} \quad (43)$$

- \dot{Q}_s = Wärmebedarf des vergehenden Tages (*kW*)
- T_{nc} = Mindestaussentemperatur für Heizarbeit ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{med} = durchschnittliche Aussentemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
- T_c = Innentemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
- T_F = Aussentemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
- α = Nutzfaktor
- t_L = Ladungsdauer (*s*)

Elektrische Zentral Nachtspeicherheizung: Für die Speicherung der aufgenommenen Wärme steht auch die sogenannte Zentral Nachtspeicherheizung zur Verfügung, die auch mit einer solarthermischen Anlage kombiniert werden kann. Diese Zentral Nachtspeicherheizung benötigt ein Zentralheizungssystem, welches die gewonnene Wärme in die jeweiligen Räume verteilt. Das Speichermedium kann Magnesit, Wasser oder Paraffin sein. Die Funktionsweise eines Zentral Nachtspeicherofens weicht nicht von der einer Einzel Nachtspeicherheizung ab. Im Gegensatz zu dieser wird die Restwärme ebenfalls im Zentral Nachtspeicherofen berücksichtigt.

50

Diese Technologie funktioniert mit mehreren Wasserbehältern, die durch Strom erwärmt werden und damit die Heizung erhitzen. Weiterhin besitzen diese Zentral Nachtspeicheröfen auch einen elektrischen Durchlauferhitzer, der auch das Warmwasser erwärmt.

Temperaturen bis zu $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ können durch Wärmespeicherung erreicht werden. Die Zentral Nachtspeicherheizung besitzt eine gute Isolierung, damit Wärmeenergie nicht ungenutzt an den Raum abgegeben wird. Eine Alternative zur Speicherheizung ist die Direktheizung, mit der Sie direkt die gewünschte Wärme für den aktuellen Tag einstellen können und nicht einen Tag vorher entscheiden müssen, welche Temperaturen man am nächsten Tag haben möchte. [i3]

Der Speicherkern gibt die aufgenommene Wärme aus dem Nachtstrom, solange die eingestellte Temperatur noch nicht erreicht ist, bedarfsgerecht ab. Der Nachtspeicher kann sich durch eine Einzelraumregelung abschalten und der Speicherkern versorgt den Raum mit Wärme. Bei mangelnder Wärme in dem Speicherkern wird der Nachtspeicherofen mit Tagstrom betrieben um den Raum weiter mit Wärme versorgen zu können, was durch den kurzfristigeren Einsatz relativ oft höhere Kosten verursachen.

7.2. Bauteile einer Speicherheizung

Speicherkernel: Als Speichermedium wird meistens ein Schamottestein verwendet. Dieser feuerfeste Stein wird künstlich hergestellt und hat einen 10-40 prozentigen Aluminiumoxid-Anteil. Ebenfalls kann man auch Speckstein benutzen, welcher allerdings geringe Mengen Asbest enthalten soll. Der Vorteil von Schamottestein ist, dass er auf eine sehr hohe Temperatur bis zu 1.400 °C erhitzt werden kann.

Heizwiderstand: Ist ein elektrisches Bauelement, das nach dem Ohmschen Gesetz die Fähigkeit besitzt, je nach geometrischer Abmessung und Beschaffenheit, durch einen Spannungsabfall und einen elektrischen Stromfluß Leistung zu verbrauchen. Diese elektrische Leistung wird auch dabei nach dem Joule-Effekt eine Wärme erzeugen, die durch Strahlung und Konvektion dem Speicherkernel zugeführt wird. Diese Wärme wird durch die besondere Beschaffenheit des Steines gespeichert.

Aufladeregler: Dieses Gerät hat die Funktion den Wärmebedarf des Raumes für den nächsten Tag zu berechnen. Die Aufladesteuerung kann mit Hilfe eines Außentemperaturfühlers den Energiebedarf dem Laderegler in den einzelnen Wärmespeichern vorgeben. Bei jedem Wärmespeicher befindet sich ein Laderegler, der eine Unterbrechung des Aufladens ermöglichen kann, wenn der abgeschätzte Wärmebedarf erreicht wird. Dieser Prozess erfolgt, wenn die Temperatur des Speichermediums als Istwert über einen Temperaturfühler an dem Schamottestein ermittelt und mit einem im Laderegler gespeicherten Sollwert verglichen wird. Die Abschaltung der Wärmespeicherung findet nur statt, wenn diese zwei Temperaturen den gleichen Wert erreicht haben.

Wärmelüftung: Dieses Bauteil des Heizgerätes übernimmt die Aufgabe die gespeicherte Wärme im Raum zu verteilen. Das gesamte Gerät besteht nicht nur aus einem Tangentiallüfter für eine extrem leise Betriebsweise und gleichmäßige, zugfreie Luftverteilung oder aus Luftkanälen, sondern auch aus einem Luftgebläse, das durch das Erzeugen einer Luftströmung die Wärme aus dem Stein aufnehmen und der Raumluft zuführen kann. [i4]

8. Kosten

Wärmepumpe

Neben den Investitionskosten für die Anschaffung und den Nebenkosten wie zum Beispiel für Versicherung, Wartung, Überwachung und Reinigung, sind unter dem Blickwinkel der Wirtschaftlichkeit die verbrauchsgebundenen Kosten, die von der Jahresarbeitszahl beeinflusst werden, zu beachten. Die Jahresarbeitszahl entscheidet über die Effizienz und die Qualität der Wärmepumpe, indem sie den Wirkungsgrad von nutzbarer Wärme mit dem zum Betrieb nötigen Strom für alle Wärmepumpen in ein vergleichbares Verhältnis setzt. Dennoch ist sie längst nicht die einzige Größe, die etwas über die Effizienz und damit die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpentechnik aussagt. Das bedeutet die Betrachtung aller Faktoren in ihrer Gesamtheit geben Aufschluss darüber, ob sich die Anschaffung einer Wärmepumpe lohnt. Im Vergleich mit anderen Heizungsanlagen, die elektrisch betrieben werden, sind die elektrischen Wärmepumpen eine gute Wahl für langfristiges Kostensparen, da Sie einen höheren Wirkungsgrad und COP (Coefficient of Performance) haben. Dieser Faktor vergrößert sich mit sinkender Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmeanlage. Je höher die Wärmequellentemperatur und je niedriger die Vorlaufzeit der Heizung ist, desto höher sind somit auch die Jahresarbeitszahl und der Wirkungsgrad. Die Berechnung der Kosten erfolgt durch die Multiplikation des Energiepreises des Stromanbieters mit dem gesamten Energiebedarf minus der gewonnenen Umgebungsenergie oder durch die Jahresarbeitszahl wie folgt:[\[G2\]](#)

52

$$JAZ = \frac{\dot{Q}_s}{\dot{W}} \rightarrow \dot{W} = \frac{\dot{Q}_s}{JAZ}$$

$$\text{Verbrauch} = \dot{W} \cdot t \rightarrow \text{Kosten} = \text{Verbrauch} \cdot \text{Preis} \quad (44)$$

$$\text{Kosten} = \frac{\dot{Q}_s \cdot t \cdot \text{Preis}}{JAZ} \quad (45)$$

- JAZ = Jahresarbeitszahl.
- \dot{Q}_s = Wärmebedarf.
- \dot{W} = Aufwand.
- t = Zeitdauer.

Je grösser die JAZ ist, desto geringer sind die Kosten pro Jahr.

Elektrische Heizung

Der Stromverbrauch von Elektroheizungen entspricht den Betriebskosten, da die elektrische Energie direkt in thermische Energie umgewandelt wird, wobei keine nennenswerten Energieverluste auftreten. Wenn es sich beispielsweise um Heizlüfter, Konvektoren oder Nachtspeicheröfen handelt, muss es berücksichtigt werden, dass die Wärme über Luftgebläse verteilt wird. Ein eingesetzter Ventilator an dem Heizkörper wendet auch hierfür zusätzliche Energie auf. Abhängig von der Heizungsart und der Leistungsstufe können diese Zusatzfunktionen den Stromverbrauch beeinflussen. Strahlungsheizungen, wie zum Beispiel Infrarotheizungen oder Heizstrahler, benötigen hingegen nur selten Ventilatoren, da sie ihre Wärme direkt in Form von Wärmestrahlung an ihre Umgebung übertragen.

Nicht nur bei der Direktheizung, sondern auch bei Speicherheizsystemen, wird die elektrische Leistung großen zusätzlichen Stromverbrauch bedingen. Die Steuerung eines Heizgerätes ist auch für die Stromkosten von Bedeutung, da die Heizleistung und die Betriebszeit bzw. Betriebsdauer der einzelnen Heizstufen, der Zeitintervalle, der Heizmodi und Temperaturvorgaben durch einfache Schalter, Sensoren, Thermostate oder Zeitschaltuhren geregelt werden können. Abgesehen von den erheblichen Stromkosten ist die Anschaffungskosten einer Elektroheizung von Bedeutung, jedoch sind diese meist relativ günstig.

53

Mit einem Direktheizgerät können Räume günstig beheizt werden und der Stromverbrauch kann ganz einfach berechnet werden. Die Berechnung ergibt sich aus der Wattleistung der jeweiligen Heizstufe und aus der Dauer des Betriebes:

$$\text{Verbrauch} = \dot{W} \cdot t \rightarrow \text{Kosten} = \text{Verbrauch} \cdot \text{Preis}$$

Über die Regelung mit Thermostaten mit Temperaturvorgabe oder Zeitschaltuhren und mit einem automatischen autonomen Programm, könnten die eingesetzten Elektrogeräte weniger Strom benötigen. Wenn die Raumtemperatur ein gewisses Niveau oder bestimmte Zeitvorgaben eintreten, werden die Heizgeräte je nach Wärmebedarf im Verlauf des Tages laufen, da Sie immer in Bereitschaft sind. Somit haben Sie eine bestimmte Laufzeit, die über den Tag zusammengerechnet werden kann. Die gleiche Formel kann auch angewandt werden, für den Stromverbrauch kurzzeitig eingeschalteter Heizgeräte für kleine Räume durch Heizlüfter, Heizstrahler oder Heizfolien. Für größere Räume mit Zeltheizung, Bautrockner, Heizkanonen oder Schnellheizer.

Elektroheizung/ Einsatzzweck	Heizleistung in Watt	Gesamte Heizdauer pro Tag	Stromverbrauch pro Tag in kWh	Kosten pro Tag
Heizlüfter/ Übergangsheizung fürs Badezimmer	2.200 Watt	1 Stunde	2,2 kWh	0,62 €
Heizstrahler/ über dem Wickeltisch	1.800 Watt	2 Stunden	3,6 kWh	1,01 €
Handtuchheizkörper/ Zusatzheizung fürs Badezimmern	600 Watt	4 Stunden	2,4 kWh	0,67 €
Infrarotheizung/ Ausschließliche Heizung fürs Büro	800 Watt	6 Stunden	4,8 kWh	1,34 €
Heizkanone/ Zeltheizung	3.000 Watt	8 Stunden	24 kWh	6,72 €

Tab. 9. Beispiele für Stromverbrauch und Stromkosten verschiedener Elektroheizungen für unterschiedliche Heizeinsätze [9]

Elektrofußbodenheizungen arbeiten nach dem gleichen Prinzip wie normale Elektroheizungen, werden eben aber unter dem Fußboden verlegt. Die Temperatur der Bodenschicht über der Elektroanlage lässt sich mittels Thermostat angenehm temperieren. Auch ein Vorteil dieser Heizungsart ist, dass Sie als besonders angenehm empfunden wird, da sie die Füße wärmt und den Raum von unten her aufheizt. Der Stromverbrauch für elektrische Fußbodenheizungen ist von der verlegten Fläche in Quadratmetern, der Wattleistung und der Heizdauer abhängig.

Stromverbrauch und Stromkosten senken:

Die Höhe der Kosten hängt vom gesamten Verbrauch und dem Stromtarif ab. Der Stromverbrauch kann durch verschiedene Sparmaßnahmen gesenkt werden, wie zum Beispiel durch vernünftiges und vorausschauendes Heizverhalten.

Um Kosten zu sparen hat man die Option des Einbaus eines Nachtspeicherofens, dessen thermische Leistung zwar immer abhängig vom Wärmebedarf ist, aber die Kosten geringer sein können. Nachts wird in der Regel weniger Strom verbraucht. Die Kraftwerke produzieren jedoch durchgehend auch in der Schwachlastzeit Strom. Aus diesem Grund ist der Einsatz einer Nachtspeicherheizung empfohlen.

In der folgenden Tabelle wird die elektrische Leistung der Fußbodenheizung pro Quadratmeter für ein gesamtes Jahr dargestellt. Erwiesen ist es dass eine realistische Anzahl an Heizstunden für ein gesamtes Jahr bei 2000 Stunden liegt. Im Schnitt liegt die Anzahl an Heizstunden für ein gesamtes Jahr bei etwa 2000. Die folgende Prognose wurden mit dieser Anzahl an Heizstunde berechnet.

Elektrische Leistung pro Fläche	Fläche	Gesamte leistung	Heizstunden pro Jahr	Stromverbruach pro Jahr	Kosten pro Jahr
100 Watt	5 m ²	0,5 kW	2.000	1.000 kWh	280 €
100 Watt	8m ²	0,8 kW	2.000	1.600 kWh	448 €
100 Watt	12m ²	1,2 kW	2.000	2.400 kWh	672 €
100 Watt	20 m ²	2,0 kW	2.000	4.000 kWh	1.120 €
120 Watt	5 m ²	0,6 kW	2.000	1.200 kWh	336 €
120 Watt	8m ²	0,96 kW	2.000	1.920 kWh	538 €
120 Watt	12m ²	1,44 kW	2.000	2.880 kWh	806 €
120 Watt	20 m ²	2,4 kW	2.000	4.800 kWh	1.344 €
140 Watt	5 m ²	0,7 kW	2.000	1.400 kWh	392 €
140 Watt	8m ²	1,12 kW	2.000	2.240 kWh	627 €
140 Watt	12m ²	1,68 kW	2.000	3.360 kWh	941 €
140 Watt	20 m ²	2,8 kW	2.000	5.760 kWh	1.613 €

55

Tabelle 10. Kosten verschiedener Fussbodenheizungen für ein Jahr

Nachtspeicherheizung

Nachts liegen die Netznutzungsentgelte im Niederspannungsberich für die Stromanbieter um ein drittel niedriger, weswegen dann auch der Preis für die privaten Nutzer niedriger ist. Ohne dieses niedrigere Entgelt liegen die Stromtarife für Nachtspeicherheizungen wesentlich höher. Bei einem ungeplanten höheren Stromverbrauch in den Schwachlastzeiten hat der Stromanbieter das Recht die Stromversorgung allerdings in einem bestimmten Umfang abzuschalten. Das nennt sich dann Sperrzeit. Es muss jedoch bedacht werden, dass das Ersetzen von Elektrospeicherheizungen durch eine Zentralheizung Nachkosten mit sich bringen kann. In der Regel müssen ein neuer Heizwärmeerzeuger und auch ein Heißwassersystem

mit zum Beispiel Heizkörpern, die nachinstalliert werden. Leider sind diese Nachkosten relativ hoch. Deswegen sollte individuell ermittelt werden, welches Heizungssystem sich lohnt. Die Frage ist, ob der Ersatz der Elektrospeicherheizung oder der Umstieg auf ein Zentralheizungssystem wirtschaftlich vorteilhafter ist.

Die Kosten des Verbrauchs einer Heizungsanlage sind von dem Strompreis des Stromsponsors abhängig. Eine Abschätzung kann je nach Verbrauchsdauer unabhängig von der Koppelstelle berechnet werden:

$$\kappa = \dot{W}_s \cdot \epsilon \cdot t \quad (46)$$

- κ = Kosten (€)
- \dot{W}_s = Verbrauchte Leistung (kW)
- ϵ = Preis der Energie (€/kWh)
- t = Dauer der Nutzung (s)

Standardnachtspeicherofen		
Leistung	Preis	
4 kW	700 Euro bis 1.000 Euro	Für ein normales Wohnhaus geeignet. Die Niedrigbaureihen als Variante von Nachtspeicherofen kosten etwas mehr, so etwa 1.300 Euro für ein 3,5 kW Gerät.
Die Zentral Nachtspeicherheizung		
Leistung	Preis	
von circa. 10,5 kW	kosten in Höhe von etwa 2.000 Euro	Ein Wasserspeicher mit gleicher Leistung, von zum Beispiel 700 Litern und mit Aufladesteuerung kostet die circa 5.400 Euro.

Tab. 11. Kosten von verschiedenen Heizgeräten [10]

9. Schadensermittlung von Emissionen

Wärmepumpe

Wärmepumpensysteme arbeiten mit Umweltwärme und nicht genutzter Abwärme. Außerdem mit Stromenergie, deren Erzeugung und Transport große Schadstoffemissionen verursacht. Diese Schadstoffe stellen für die unmittelbare Umgebung eine Belastung dar und verstärken den Treibhauseffekt. Die Hauptschadstoffe, die eine monovalent betriebene Elektrowärmepumpe als Heizungsanlage verursacht (siehe Kap. 5.1), sind Schwefeldioxid(SO₂), Stickoxid(NO_x), Kohlenmonoxid(CO), Aromate(C_xH_y), Kohlendioxid(CO₂) und Staub. Der Einsatz einer Wärmepumpe kann daher über die beachtlichen Reduktionen bei allen genannten Schadstoffen gegenüber den Öl- und Gasheizungsanlagen einen guten Beitrag zum Umweltschutz leisten.

In diesem Kapitel wird eine Studie über die Umweltverträglichkeit von Wärmepumpen betrachtet. Das Ziel dieser Studie ist es, die gesamten nachfolgend entstehenden Emissionen einer Wärmepumpenanlage im Verlauf eines Jahres aufzuzeigen. Kältemittel können durch direkte Emissionen die Umwelt schädigen, Darüber hinaus können diese einen Einfluss auf die erzielbare Leistungszahl der Wärmepumpenanlage und damit auf den Wärmebedarf haben. Ein erhöhter Stromverbrauch geht mit einem erhöhten Schadstoffausstoß in den Kraftwerken einher. Die Emissionen können somit auch vom gewählten Kältemittel abhängig sein (siehe Kapitel 5.3).

Die erzeugten Gase aus dem System werden immer abhängig von den verschiedenen Kältemitteln sein. Die betrachteten Kältemittel für die Simulation der Wärmepumpe sind das R22, R134a und Ammoniak. Die Höhe der Emission von CO₂ ist der maßgebliche Faktor für die Umweltverträglichkeit. Der grosse Anstieg dieses Gases in der Atmosphäre trägt zu einer Vergrößerung der so genannten Treibhauseffektpotential bei. Der thermischen Zustand der Ozonschicht ändert sich, was zu einer Erhöhung der Oberflächentemperatur des Planeten beiträgt. CO₂-Emissionen haben zwar den größten Einfluß auf den Treibhauseffekt, da am meisten davon in die Atmosphäre gelangt. Das Ozonloch allerdings wird durch Kältemittel verursacht. Das in die Umwelt Gelangen der Kältemittel wird als direkte Emission bezeichnet. Darüber hinaus müssen auch die so genannten indirekten Emissionen, die nicht direkt durch das Kältemittel aus der Wärmepumpenanlage erzeugt werden, berücksichtigt werden. Es handelt sich um Emissionen, die durch die Energieerzeugung in den Kraftwerken verursacht werden. Die indirekten Emissionen werden dort durch die Erzeugung des elektrischen Stroms verursacht und haben einen großen Einfluss auf die Umweltverträglichkeit. Bei erhöhtem ElektrischeLeistungsbedarf

einer Wärmepumpenanlage wird mehr Strom verbraucht. Die Erzeugung des elektrischen Stromes erfolgt in den Kraftwerken zum großen Teil über die Verbrennung fossiler Brennstoffe, was einen großen Ausstoß an CO₂ nach sich zieht.

Bei der Einschätzung der Umweltverträglichkeit einer Wärmepumpenanlage sind nicht nur die Schadstoffemissionen von Bedeutung, sondern auch andere Aspekte, die die Umwelt belasten, wie zum Beispiel die Lärmerzeugung durch die eingesetzten Bauelemente in der Anlage, die je nach Größe und Verbrauch sehr laut und störend ausfallen kann. Außerdem kann Feinstaub entstehen. Es handelt sich um kleine Partikel oder Tröpfchen, die in die Luft gelangen und die Gesundheit gefährden können. Diese Effekte haben einen direkten schädlichen Einfluss auf den Menschen und müssen so gut wie möglich verhindert werden.[B3]

Elektrische Heizung

Die elektrischen Heizungen erzeugen nutzbare Wärme, die nahezu zu hundert Prozent aus dem eingesetzten elektrischen Strom umgewandelt wird (siehe Kap. 6).

Diese Umwandlung findet durch Wärmeübertragung statt und erzeugt damit keine direkten CO₂-Emissionen. Die Aussage, dass eine elektrische Heizung keine CO₂-Emissionen verursacht ist natürlich falsch, da ein Großteil des Stroms hierzulande schließlich immer noch aus klimaschädlichen Kohlekraftwerken kommt. Dadurch verursachen Elektroheizungen indirekt sehr wohl Kohlendioxid. Viele Experten bezeichnen den Einsatz von Elektroheizungen als unverantwortlich und ineffizient, weil die CO₂-Emissionen von Elektroheizungen pro Kilowattstunde mehr als doppelt so hoch liegen wie bei modernen Erdgasheizungen. Obwohl die Heizgeräte an sich kaum Energie verlieren und ihre Wirkungsgradwerte fast bei hundert Prozent liegen, bleibt das gesamte System in Bezug auf die Schadstoffemissionen extrem ineffizient. Ein Grund dafür ist, dass selbst moderne Großkraftwerke Wirkungsgrade von unter 50 Prozent haben. Das heißt dort geht mehr als die Hälfte der eingesetzten Primärenergie verloren.

Nachtspeicher

Die Speicherheizung kann ebenso wie die Elektroheizung auch noch viele indirekte Emissionen verursachen. Durch deren Betrieb mit elektrischem Strom, werden in großen Industrienationen wie zum Beispiel Deutschland heutzutage rund Siebzig TWh verbraucht, was über zehn Prozent des gesamten

Strombedarfs ausgemacht. Dieser Verbrauch ist in den letzten Jahren stark angestiegen, was große Konsequenzen für den Klimawandel hat, da Nachtspeicherheizungen jedes Jahr einen Ausstoß von über 30 Millionen Tonnen Kohlendioxid verursachen, was rund drei Prozent der gesamten CO₂-Emissionen darstellt. Jedes Jahr werden viele neue Widerstandsheizungen und viele normale Elektroheizungen in Wohnhäusern und vor allem in Mietwohnungen eingebaut. Somit wird der Stromverbrauch weiter zunehmen und damit noch mehr Schadstoffemissionen verursachen.[11]

Berechnung der direkte und indirekte CO₂-Emissionen:

$$E_{CO_2} = E_D + E_I \quad (47)$$

- E_{CO_2} = Gesamte CO₂- Emissionen
- E_d = Direkte Emissionen aus dem Kältemittel
- E_i = Indirekte Emissionen durch Stromerzeugung

$$E_D = GWP \cdot f \cdot C_{km} \quad (48)$$

- GWP = Treibhauspotential ($kg\ CO_2/kg\ Kältemittel$)
- f = Nutzungsfaktor der Anlage
- C_{km} = Menge des Kältemittels ($kg\ Kältemittel /kW$)

59

$$E_I = P e_i \cdot \dot{W}_s \cdot t \quad (49)$$

- $P e_i$ = CO₂ pro Verbrauchte Energie ($kg\ CO_2/kWs$)
- \dot{W}_s = Verbrauchte Leistung (kW)
- t = Dauer der Nutzung (s)

10. Simulation und Ergebnisse

Durch eine Simulation mit der Software Matlab® wurden die drei Koppelstellen mathematisch modelliert. Bei der Simulation der gesamten Kopplung der Energiesektoren werden die Koppelstellen bzw. Technologien in kleine Blöcke unterteilt. Jeder Block enthält die mathematischen Modelle des einzelnen Gerätes und wird nach einer bestimmten Zeit mit den eingegebenen Eingangsparametern aufgerufen. Dadurch werden die Ausgangsparameter für diesen Abschnitt berechnet und für das Hauptprogramm aufbereitet. Das Ziel des Programms ist es, alle relevanten Werte zu berechnen, die benötigt werden, um die gesamte Anlage in Betrieb zu nehmen.

Beim konkreten Fall einer elektrisch betriebenen Wärmepumpenanlage wird zuallererst der Wärmebedarf für die jeweiligen Geräte benötigt (siehe Kap. 4). Für die durchgeführte Simulation wurde der Wärmebedarf eines Ein-Familien-Hauses verwendet:

$$\dot{Q}_s \cong 0.618 \cdot (T_o - T_i) + 3.75 [kW]$$

60

Die Eingangsparameter der Simulation für jedes Gerät sind nahezu identisch. Das Hauptprogramm ruft die einzelnen Programme mit den folgenden Werte auf:

Eingangsparameter:

- Außentemperatur (T_F)
- Innentemperatur (T_C)
- gewünschte Temperatur (T_w)
- Wärmebedarf (\dot{Q}_s)
- Zeitschritt (t)

Wärmepumpe:

Für die Wärmepumpe wird das Programm beispielsweise mit den folgenden Eingangsparametern aufgerufen:

- Außentemperatur ($T_F = -5^\circ\text{C}$)
- Innentemperatur ($T_C = 19^\circ\text{C}$)
- gewünschte Temperatur ($T_w = 20^\circ\text{C}$)
- Wärmebedarf ($\dot{Q}_s \cong 0.618 \cdot (19 - (-5)) + 3.75 = 18.58 \text{ kW}$)
- Zeitschritt ($t = 15 \text{ Min}$)

- Kältemittel (KM = r22)

Für eine deutliche Darstellung der Simulation wird auf den Kreisprozess des Mollier-Diagramms zugegriffen, damit jeder Schritt der Berechnung in Bezug zum Kreisprozess verstanden wird (siehe Kap. 5.5.2). Abb. 16 verdeutlicht die wichtigsten Parameter für die Durchführung der Simulation, man spricht von: höchstem und niedrigstem Temperaturdruck. Diese Parameter werden später aus den Tabellen des Kältemittels entnommen.

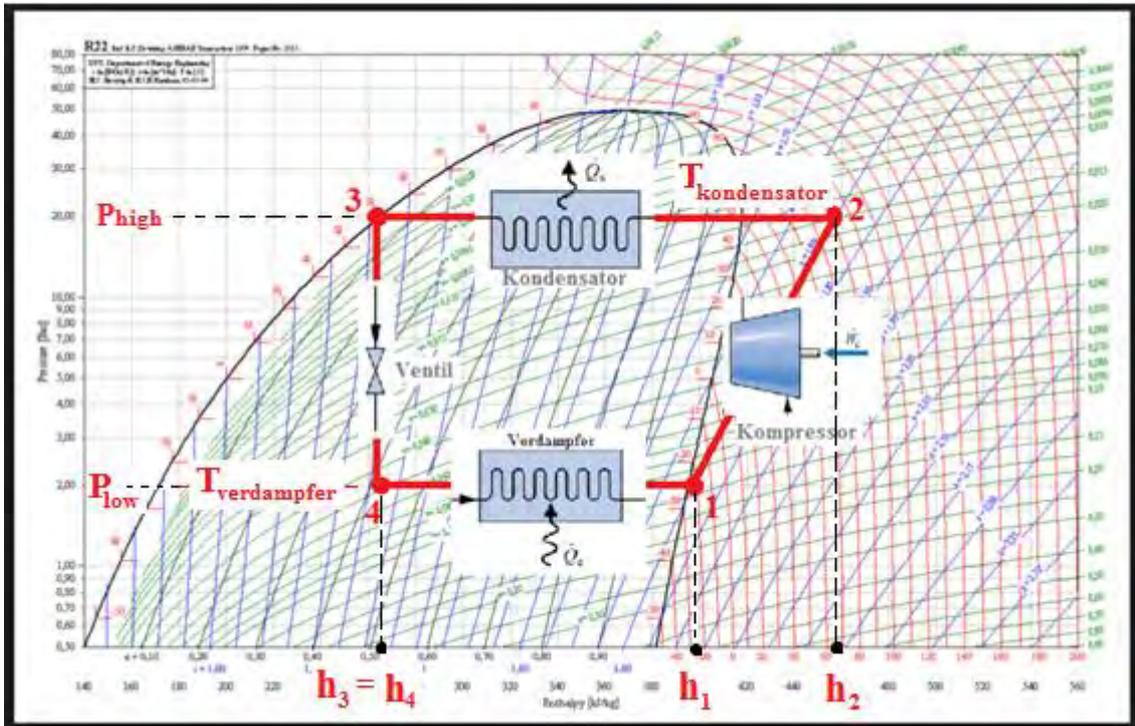


Abb. 16. Temperaturen und Druck des Verdampfers und Kondensators

Bevor die Wärmepumpe simuliert wird, wird eine Berechnung für das erste Zeitintervall des Tages aufgestellt, dafür benötigt man zunächst die Temperaturen des Verdampfers und Verflüssigers. Sie sind abhängig von den Wunsch- und Aussentemperaturen am Anfang der Heizarbeit .

$$T_F = -5^\circ\text{C} \rightarrow T_w = 20^\circ\text{C} \rightarrow T_C = 19^\circ\text{C}$$

Temperatur des Verdampfers: Diese Temperatur wird abhängig von der Außentemperatur ermittelt. Um eine Wärmeübertragung gewährleisten zu können, muss die Temperaturdifferenz zwischen Außentemperatur und der Temperatur des Verdampfers zwischen 6°C und 10°C liegen. Rechnen wir mit dem ungünstigsten Fall:

$$T_{\text{verdampfer}} = T_F - 6^\circ\text{C} = -5 - 6 = -11^\circ\text{C}$$

Temperatur des Verflüssigers: Die gewünschte Innentemperatur liegt im Winter bei ca. 22°C. Bei der Wärmezufuhr darf diese auf Komfortgründen nicht über 40°C steigen, da die Temperatur eines Menschen bei ca. 37°C liegt. Um die Wärmeübertragung zu ermöglichen, darf die Temperatur des Kältemittels nicht 40°C sein, sondern ungefähr 12°C höher. Dieser Wert kann je nach Kältemittel und Verdichter variieren. Die Temperatur des Kondensators lässt sich wie folgt ermitteln:

$$T_{\text{Kondensator}} = T_w + [T_{\text{max}} - \overline{T_w} + 12^\circ\text{C}] = T_w + 30^\circ\text{C} = 50^\circ\text{C}$$

- $T_w \rightarrow$ gewünschte Innentemperatur
- $\overline{T_w} = 22^\circ\text{C} \rightarrow$ Durchschnittliche Innentemperatur
- $T_{\text{max}} = 40^\circ\text{C} \rightarrow$ Maximale zugeführte Temperatur

Mit dieser Temperatur kann die Wärmeübertragung vom Kältemittel zur Heizungsanlage des Wohnhauses stattfinden. Die in diesem Projekt betrachtete Heizungsanlage versorgt das Wohnhaus mit einer Raumheizung und einer Warmwasserbereitung. Bei diesen beiden Systemen wird nur mit einem einzigen Verflüssiger gerechnet, der die Wärme in beide Systeme verteilt.

Die Wärmepumpe wird dann mit diesen konstanten Parametern modelliert, jedoch kann der Anwender des Programms stets Parameter je nach Kältemittel, Haus- und Wetterbedingungen modifizieren.

Druckdifferenz des Kompressors: Mit den Temperaturen des Verdampfers und Kondensators kann man mit Hilfe des Mollier-Diagramms (Abb. 16) den gesamten Kreisprozess darstellen. Außerdem können die notwendigen Parameter für die gesamte Berechnung entnommen werden, wie zum Beispiel Enthalpien, Druck usw. In Tabelle 12 (Siehe Anhang Kap. 15) kann ebenso auf die zugehörigen Druckwerte zugegriffen werden.

$$P_{\text{ver}}(-11^\circ\text{C}) = 3.4 \text{ Bar} = 3.4 \cdot 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}^2}$$

$$P_{\text{Kon}}(50^\circ\text{C}) = 19.4 \text{ Bar} = 1.94 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}^2}$$

Da der Druck in dem Verdampfer nach der Drosselung für die eingegebene Temperatur erreicht wird, rechnet man mit einem kleinen aber relevanten

Druckverlust. Das heißt, es wird mit einem niedrigeren Druck von circa 10% gerechnet.

$$P_{low} = 0.9 \cdot P_{ver} = 3.06 \cdot 10^5 \frac{kg}{m \cdot s^2}$$

Ebenfalls werden Druckverluste in dem Verflüssiger nach der Verdichtung für die eingegebene Temperatur stattfinden. In diesem Fall rechnet man mit einem circa 10% höheren Druck, damit der Zieldruck erreicht wird.

$$P_{high} = 1.1 \cdot P_{Kon} = 2.134 \cdot 10^6 \frac{kg}{m \cdot s^2}$$

Enthalpien des Kreislaufes: Wenn die Temperaturen des Verdampfers und des Verflüssigers bekannt sind, können die gesättigten Enthalpien h_1 , h_3 und h_4 des Kreisprozesses aus der Tabelle 12 entnommen werden.

Enthalpie am Ausgang des Verflüssigers (Punkt 3 des Diagramms) wird aus der neunten Spalte der Tabelle 12 (gesättigtem Dampf oder sat.Vapor h_g) entnommen:

$$h_3(50^\circ\text{C}) = 108.06 \frac{kJ}{kg}$$

Enthalpie am Ausgang des Verdampfers (Punkt 1 des Diagramms) wird aus der siebten Spalte der Tabelle 12 (gesättigter Flüssigkeit oder sat.Liquid h_f) entnommen:

$$h_1(-11^\circ\text{C}) = 245.2 \frac{kJ}{kg}$$

Es wird davon ausgegangen, dass die Drosselung des Fluids zwar kein isentrope aber isenthalper Prozess ist (siehe Kap. 5.5), das heißt, die Enthalpie am Ausgang des Verflüssigers ist dieselbe Enthalpie an und vor dem Drosselventil bzw. am Eingang des Verdampfers (Punkt 4).

$$h_4 = h_3 = 108.06 \frac{kJ}{kg}$$

Entropie des Kompressors: Der ideale Kreisprozess der Wärmepumpe verdichtet das Kältemittel durch eine isentrope Kompression (Prozess 1→2 des Diagramms). In dem Punkt 1 befindet sich das Kältemittel noch in einem gesättigten gasförmigen Zustand, das heißt, die Entropie in diesem Punkt kann bekannt sein und aus der Tabelle 12 mit Hilfe des Drucks (P_{low}) ausgelesen werden. Mit der Entropie des Punkts 1 (S_1) zusammen mit dem höchsten Druck (P_{high}) kann die Enthalpie (S_2) des Punkts 2 (Am Ausgang des Verdichters) ermittelt werden. Da das Kältemittel sich im Heizdampfgebiet befindet, ist es nicht mehr gesättigt und darf nicht aus der Tabelle 12 entnommen werden. Dafür gibt es die normierten Tabellen 13 -16 für Heizdampf, aus welchen die Enthalpie (h_2) mit Hilfe des Druckwertes (P_{high}) und dessen Entropie (S_2) auf dem Punkt 2 abgelesen werden kann. Die überhitzte Temperatur kann am Ausgang des Verdichters gemessen werden. Dies ist alles möglich, wenn die Verdichtung nach dem isentropen Prozess erfolgt. Abb. 17 verdeutlicht, wie die Verdichtungslinie (Prozess 1→2 des Diagramms) über der Isentropelinie bis Punkt 2 steigen.

$$S_1(-11^\circ\text{C}) = 0.94 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \rightarrow S_2(\text{isentropen Prozess}) = S_1$$

Die Enthalpie h_2 am Ausgang des Kompressors (Punkt 2 des Diagramms) wird aus der Tabelle 16 für den gerechneten Druckwert $P_{high} = 2.134 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}^2}$ und die Entropiewert $S_2 = 0.94 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ entnommen. In diesem Fall muss eine lineare Interpolation zwischen den Enthalpienwerten und Druckwerten aus den Spalten von 20 Bar und von 24 Bar der Tabelle 16 aufgestellt werden:

- Für $P_{high,1} = 20 \text{ Bar}$ und $S_{2,1} = 0.94 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \rightarrow h_{2,1} = 290.47 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- Für $P_{high,2} = 24 \text{ Bar}$ und $S_{2,2} = 0.94 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \rightarrow h_{2,2} = 294.75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- $P_{high} = 2.134 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}^2}$

$$h_2 = \frac{(21.34 - 20) \cdot (294.75 - 290.47)}{24 - 20} + 290.47 = 291.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Wenn alle Enthalpien- und Entropienwerte aus den Tabellen entnommen wurden, können die internen Parameter der Wärmepumpe mit den Formeln 25-

29 (siehe Kap 5.5) berechnet werden. Diese Parameter werden die Simulation und Ermittlung der Ausgangsparameter ermöglichen.

Die gesuchten Ausgangsparameter für die Koppelstation sind: Energieaufwand, Kosten und Emissionen der Koppelstellen.

Massenstrom des Kreislaufes: Der Massenstrom ist ein sehr wichtiger Wert, da er bei allen Bauteilen der Wärmepumpe gleich ist. Der Massenstrom kann aus der Formel 29 mit Hilfe des Wärmebedarfs und der Enthalpien an dem Kondensator berechnet werden:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_s}{(h_2 - h_3)} = \frac{18.58 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right]}{(291.9 - 108.06) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]} = 0.1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Wärmezufuhr am Verdampfer: Wenn das Kältemittel in den Verdichter einfließt, überträgt es die Wärme \dot{Q}_e in das System aus der Umgebung. Diese Wärme lässt sich mit der Formel 28 wie folgt berechnen:

$$\dot{Q}_e = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) = 0.1 \cdot (245.2 - 108.06) = 13.71 \text{ kW}$$

Antriebsenergie des Kompressors: Die zugeführte Arbeit am Kompressor kann nach der Ermittlung der gesamten Enthalpien des Kreisprozesses:

$$\dot{W}_s = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) = 0.1 \cdot (291.9 - 245.2) = 4.67 \text{ kW}$$

Kennzahlen: Der Wirkungsgrad und der COP-Wert lassen sich nach der Ermittlung der Antriebsleistung \dot{W}_s berechnen:

- COP- Wert nach dem Carnotschen Prozess:

$$\eta_w = \frac{T_c}{T_c - T_F} = \frac{19 + 273.15}{(19 + 273.15) - (-5 + 273.15)} = 12.17$$

- Tatsächlicher COP-Wert:

$$COP_w = \frac{\dot{Q}_s}{\dot{W}_s} = \frac{18.58}{4.67} = 3.97$$

Mit den bekannten COP-Werten kann man beobachten, wie weit ein realer Prozess an den idealen theoretischen Carnot-Prozess durch Berechnung des Gütegrades angenähert ist. Die Heizanlage könnte ein schlechtes wirtschaftliches Ergebnis leisten, wenn die Umgebungsbedingungen sehr komplex sind, das heißt, die Außentemperatur ist sehr niedrig oder der Wärmebedarf ist sehr hoch. Je kleiner die Temperaturdifferenz, desto höher der COP-Wert. Formel 36 zeigt dieses Ergebnis:

$$\eta_G = \frac{COP}{\eta_{cop}} = \frac{3.97}{12.17} = 0.327 \rightarrow 32.7\%$$

Betriebskosten: Die Kosten des Verbrauchs einer Wärmepumpeanlage sind von dem Strompreis €/kWh abhängig. Eine Abschätzung kann je nach Verbrauchsdauer berechnet werden, das heißt, wie lange die Anlage am Tag funktioniert. Wenn die Wärmepumpe abgeschaltet ist, ist der mathematische Wärmebedarf gleich Null, ebenfalls sind die anderen Parameter auch:

$$\kappa = \dot{W}_s \cdot \epsilon \cdot t = 4.67 \cdot 0.2 \cdot 0.25 = 0.24\text{€}/\text{Zeitintervall}$$

- κ = Kosten (€)
- \dot{W}_s = Verbrauchte Leistung (kW)
- ϵ = Preis der Energie (0.2 €/kWh)
- t = Dauer der Nutzung 15 Min = 0.25 Stunden (h)

CO2-Emissionen: Emissionen können nach der Formel 48 berechnet werden:

$$E_{CO2} = E_D + E_I$$

Die direkten Emissionen hängen von den möglichen Ausströmen der Anlage, der gesamten Menge des Fluids und vom Treibhauspotential ab. Beim Treibhauspotential handelt sich lediglich um eine Masszahl, die eine bestimmte Masse von CO2 zur Menge eines Treibhausgases ins Verhältnis setzt. (Siehe Kap 9).

Für das Kältemittel R22:

GWP → 1810 ckm → 1 kg pro 1 kW Last des Kompressors = 4.67

f → Auströmung bei jedem Intervall. 15% pro Jahr für Mittelgrosse Anlage.

$$E_D = GWP \cdot f \cdot C_{km} = 1810 \cdot \frac{0.15}{365 \cdot 24 \cdot 0.25} \cdot 4.67 = 0.57\text{kg CO2}$$

Die indirekte erzeugten Emissionen in den Kraftwerken werden nach der folgenden Formel ermittelt:

$$Pe_i \cong 0.14 \frac{CO_2}{kWh} \rightarrow \text{Emissionen von Brennstoffen in Kraftwerken pro erzeugte kWh}$$

$$E_I = Pe_i \cdot \dot{W}_s \cdot t = 0.14 \cdot 4.67 \cdot 0.25 = 1.2 \text{ kg CO}_2$$

Diese Werte entsprechen der gesamte Menge an CO₂ in kg pro erzeugte kW und den gesamten Verbrauch pro Zeitintervall.

Im Folgenden werden alle Ausgangsparameter im Verlauf eines Tages dargestellt. Dafür wird von durchschnittlichen Temperaturwerten eines vergangenen Wintertags ausgegangen. Die folgenden Ergebnisse sind nur ein Beispiel und bestätigen den richtigen Verlauf des Programms.

Dieses Simulationsbeispiel ermöglicht den Einsatz einer Heizanlage mit einer Wärmepumpe für die Raumheizung und Warmwasserbereitung zur Wärmenutzung. Als Wärmequelle wird die Außenluft verwendet. Die Auswahl der Wärmequelle spielt eine sehr wichtige Rolle, da die Ergebnisse davon abhängen (siehe Kap. 5.2). Die Simulation kann mit den Kältemitteln R22, R134a und Ammoniak durchgeführt werden. Es wird davon ausgegangen, dass das Hauptprogramm die einzelnen Programme mit einem Intervall von 15 Minuten abrufft. Die gesamte Zeitspanne ist zwischen 8 und 20 Uhr angesiedelt, somit arbeitet die Wärmepumpe maximal 12 Stunden. Im restlichen Zeitraum wird die Wärmepumpe abgeschaltet, solange die gewünschte Innentemperatur erreicht ist. Für die Steuerung muss ein elektronischer Regler und dessen Temperaturfühler installiert sein und berücksichtigt werden.

Die folgenden Darstellungen und Schaubilder zeigen die Ergebnisse einer durchgeführten Simulation mit einer Luft/Luftwärmepumpe mit dem Kältemittel R22 für einen kalten Wintertag. Die oben genannte Wärmepumpe nimmt Wärme aus der Außenluft. Dadurch ist die Temperatur des Verdampfers direkt von der Außentemperatur abhängig. Die gewünschte Innentemperatur kann in der Regel mit einem Thermostat vom Anwender reguliert werden. Es wird davon ausgegangen, dass diese Temperatur auf 20°C, 21°C oder 22°C umgeschaltet werden kann. Für das zu betrachtende Beispiel beträgt die gewünschte Raumtemperatur 20°C.

Darstellung der Aussentemperaturänderung

Abb. 17 stellt die Änderung der Aussentemperatur im Verlauf des Tages zwischen 8 und 20 Uhr für einen willkürlichen Wintertag:

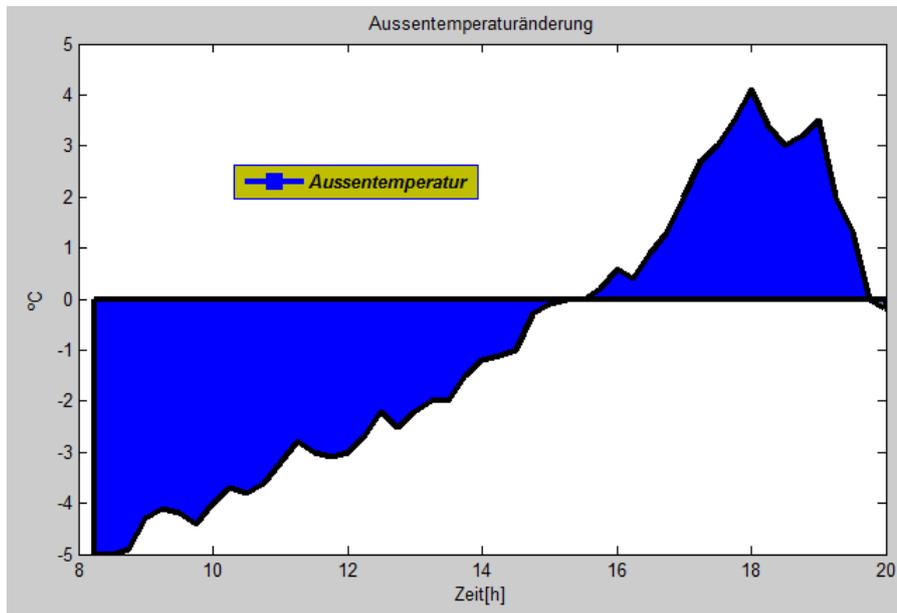


Abb. 17. Darstellung des Aussentemperaturverlaufs

Abb. 18 verdeutlicht den Energieaustausch in dem Wärmepumpensystem, in dem das Kältemittel Energie mit der Umgebung und dem Wohnhaus austauscht. Die abzugebende Wärme ist der Wärmebedarf und ergibt sich aus der Summe von der aufzunehmenden Umgebungswärme mit der zugeführten Arbeit.

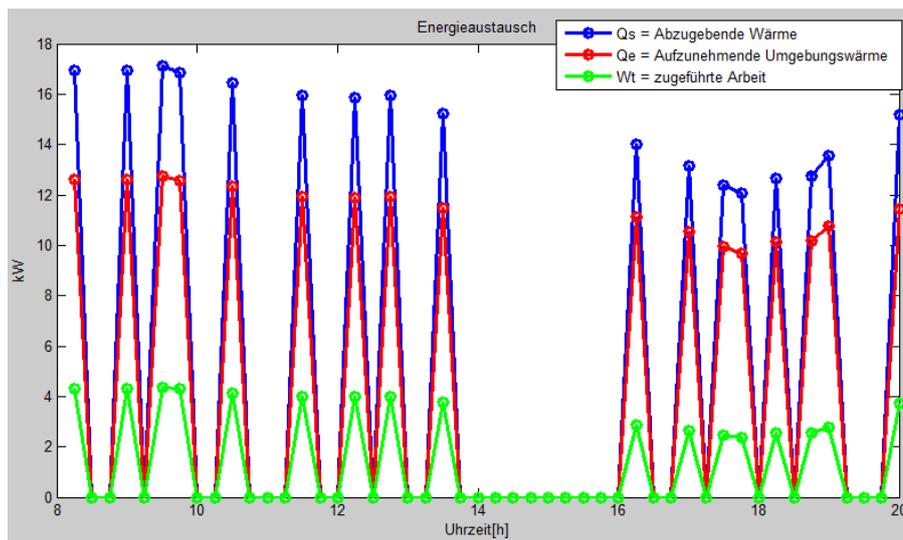


Abb. 18. Energieaustausch in dem Wärmepumpensystem

In der Abbildung 19 wird die Entwicklung der Heizlast des Wohnhauses abhängig von der Uhrzeit dargestellt. Diese Werte ändern sich mit der Außentemperatur. Die in blau eingezeichnete Linie stellt einen durchschnittlichen Wert der Warmwasserheizlast dar.

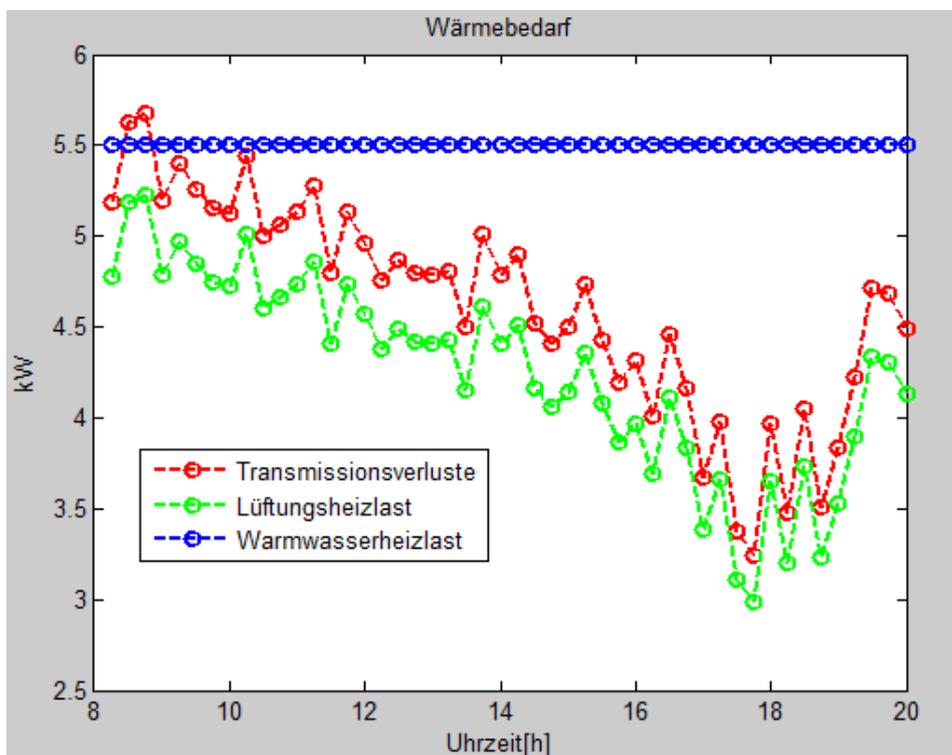


Abb. 19. Darstellung der verschiedenen Wärmeverluste und Wärmebedarf

Bei bekanntem Wärmebedarf kann der gesamte Verbrauch der Anlage am Tag dargestellt werden. Abb. 20 zeigt den elektrischen Verbrauch bei jedem zeitlichen Abschnitt von 15 Minuten in einer gesamten Zeitspanne von 12 Stunden. Alle 15 Minuten steigt dieser Wert, wenn der Wärmebedarf höher wird. In dem zu betrachtenden System kann man beobachten, dass der Energieaufwand beispielsweise zwischen 13 und 16 Uhr nicht mehr steigt. Ab dem Erreichen der gewünschten Innentemperatur wird die Anlage abgeschaltet. Am Ende des Tages wird der gesamte Energieaufwand ermittelt.

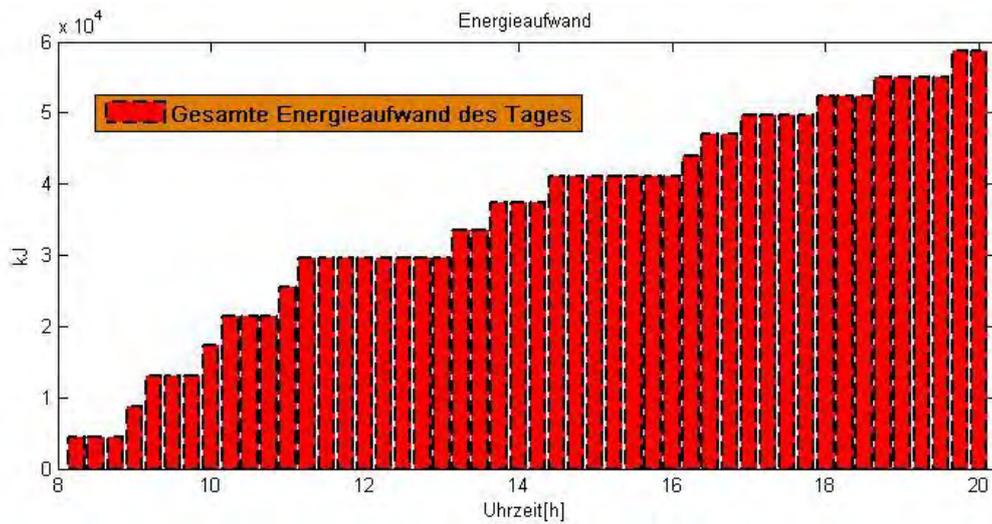


Abb. 20. Gesamte Verbrauch im Verlauf des Tages

Da das Kältemittel nur bei laufendem Kreislauf fließt, sinkt der Massenstrom auf null, wenn die Wärmepumpe abgeschaltet ist.

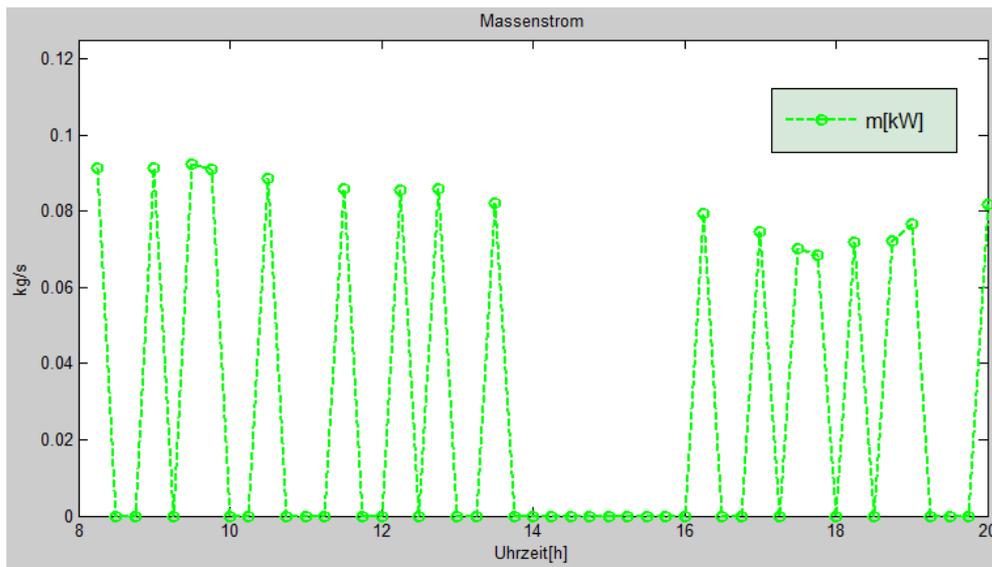


Abb. 21. Verlauf des Massenstroms in dem Kreisprozess

Abb. 22 veranschaulicht den zusätzlichen Verbrauch von den Aggregatsgeräten, die den gesamten Ablauf der Wärmepumpeanlage ermöglichen, in diesem Fall die Luftgebläse am Verdampfer und Verflüssiger.

Diese Leistung wird für den COP-Wert mit einbezogen.

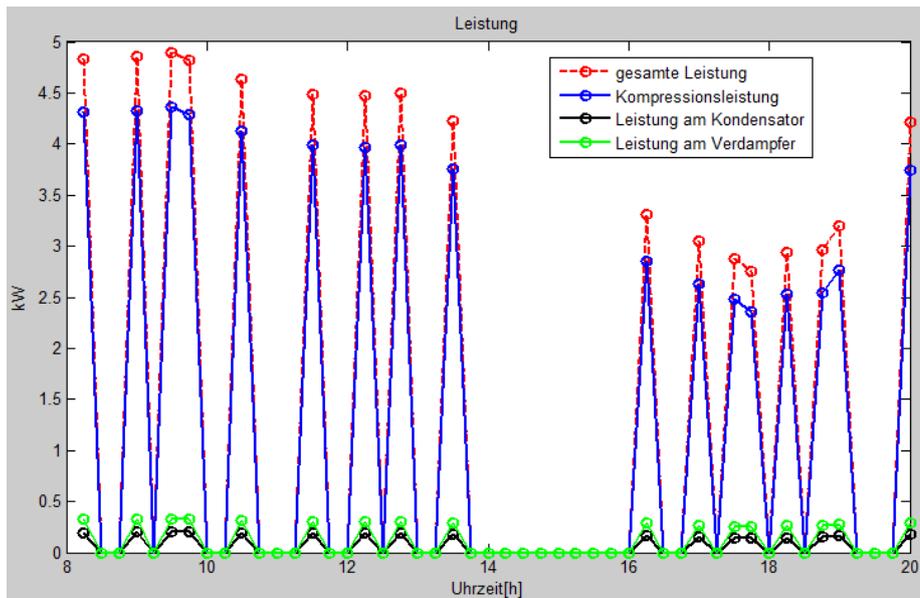


Abb. 22. Darstellung der Leistung von jedem Bauteil

Wenn man den COP-Wert nach Carnot betrachtet, ist zu berücksichtigen, dass dieser lediglich eine Tendenz verdeutlichen kann, da er ausschliesslich von der Temperatur abhängig ist. Er dient als Prediktor für den realen COP-Wert. Zwischen 16 und 20 Uhr existiert die geringste Temperaturdifferenz, dadurch ergibt sich der höchste COP-Wert. Begrenzt durch die physikalischen Bedingungen liegt der reale COP-Wert in Relation deutlich unter dem idealen COP-Wert, daraus ergibt sich der geringe Gütegrad. Abbildungen 23, 24 und 25 verdeutlichen diese Diskrepanz graphisch.

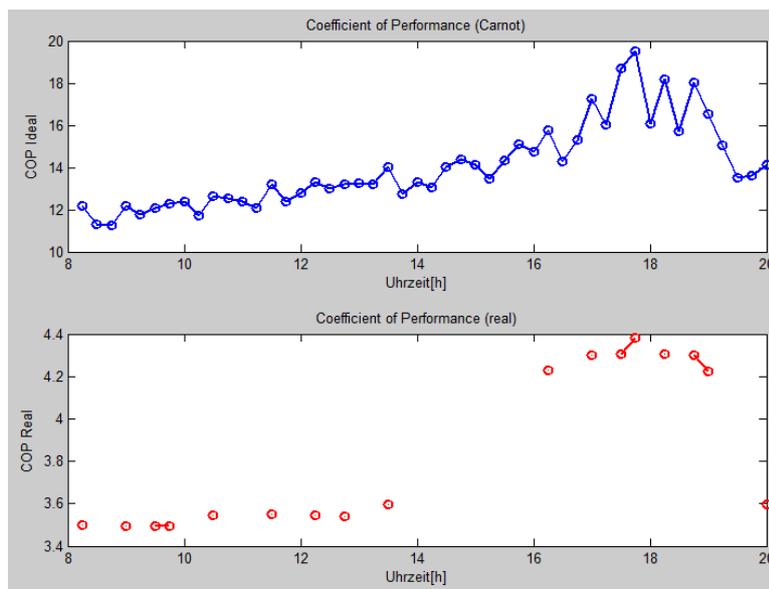


Abb. 23. COP-Wertänderung bei jedem Zeitschritt

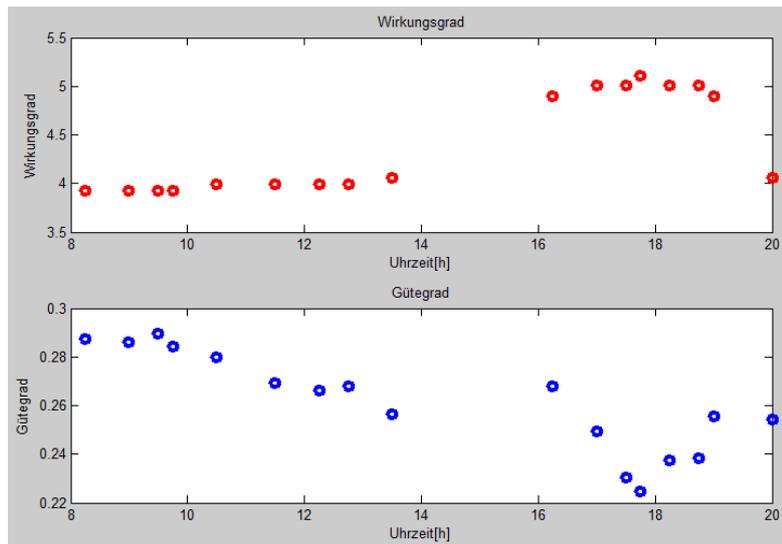


Abb. 24. Wirkungsgrad und Gütegrad bei jedem Zeitschritt

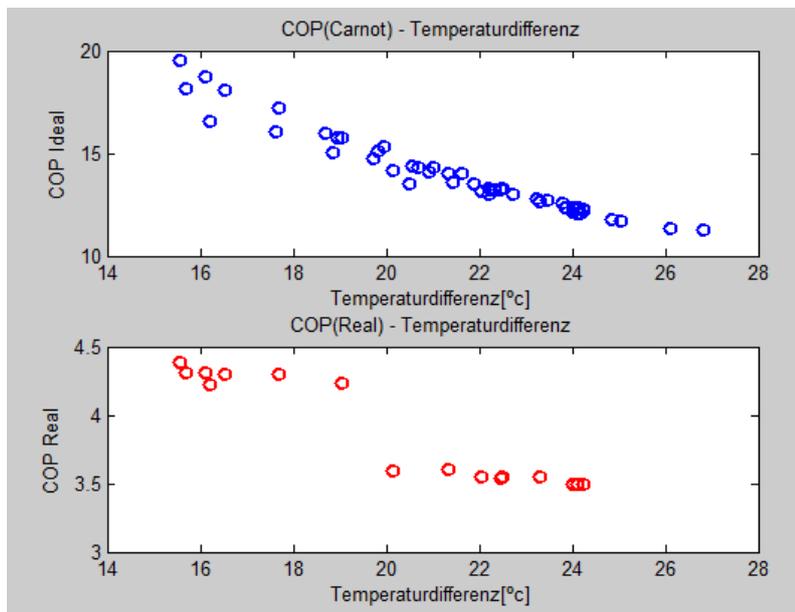


Abb. 25. Abhängigkeit des COP-Wertes von der Temperaturdifferenz zwischen Aussen- und Innentemperatur

Einer der wichtigsten Ausgangsparameter ist die Emissionsmenge, die je nach Kältemittel unterschiedlich stark schädlich sein kann. Abb. 26 zeigt die direkt und indirekt erzeugten Emissionen bei einem Intervall von 15 Minuten im Verlauf des Tages:

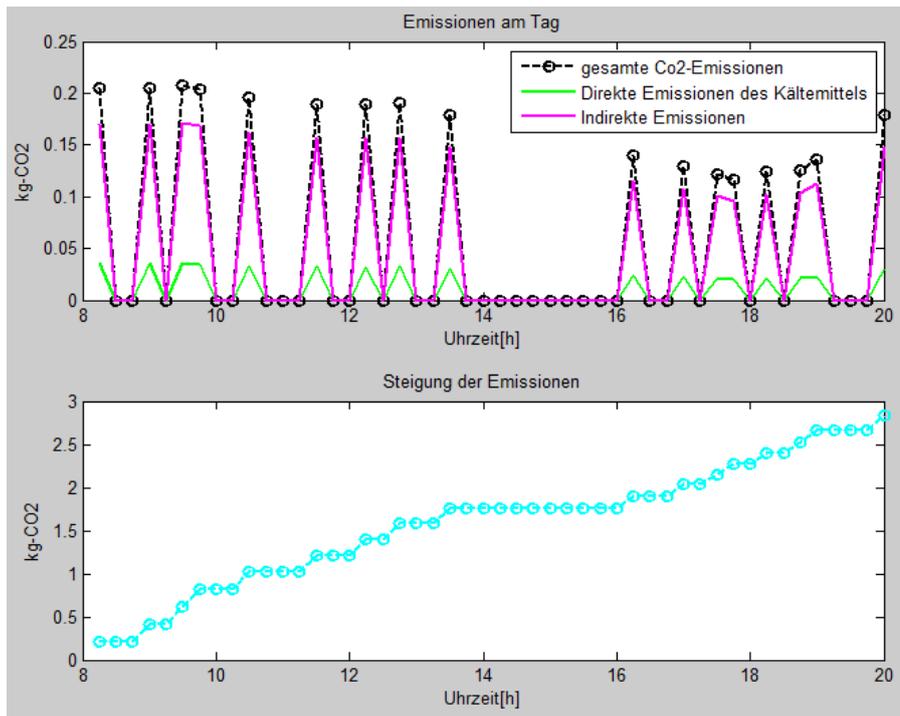


Abb. 26. Darstellung der gesamten CO₂-Emissionen durch den Ablauf der Wärmepumpenanlage

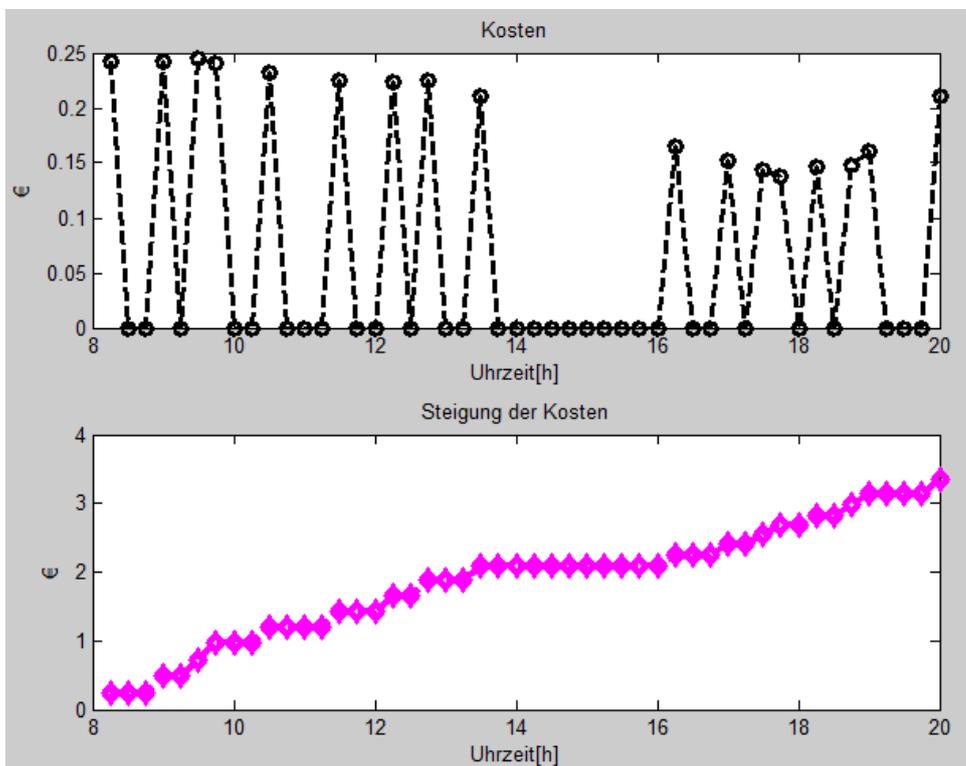


Abb. 27. Ermittlung der gesamten Kosten am Ende des Tages

Für den Nutzer einer Wärmepumpe spielen die Kosten bei der Verwendung einer solchen Anlage die wichtigste Rolle. Wie bei den schon betrachteten Parametern, sind die Kosten von dem Verbrauch und dem Wetter abhängig. Das heißt, der Anstieg der Kosten liegt nicht nur an der notwendigen Leistung der Geräte, sondern auch, wie sie verwendet werden. Darüber hinaus sind Faktoren wie die Auswahl des Kältemittels, die Wärmequelle oder die geographischen Bedingungen auch für die Kosten relevant, aber in der Regel hat der Anwender keinen direkten Zugriff auf diese Faktoren.

Die normale, angenehme Raumtemperatur liegt im Durchschnitt bei circa 21°C. Es kommt immer auf den Raum des Wohnhauses an: Schlafzimmer (18 -20 °C), Wohnzimmer (21-23°C), Badezimmer (23°C), Küche (18 -19°C). Mit Hilfe eines Thermostates kann diese Temperatur reguliert werden und Kosten einsparen.

In dem vorherigen Beispiel wurde die Simulation mit einer gewünschten Innentemperatur von 20°C durchgeführt. Nun wird betrachtet, wie die Erhöhung der dementsprechenden Innentemperatur zu einer Erhöhung der Kosten beiträgt. Für eine gewünschte Innentemperatur von 22°C lassen sich die Kosten am Ende des Tages in Abb. 28 darstellen:

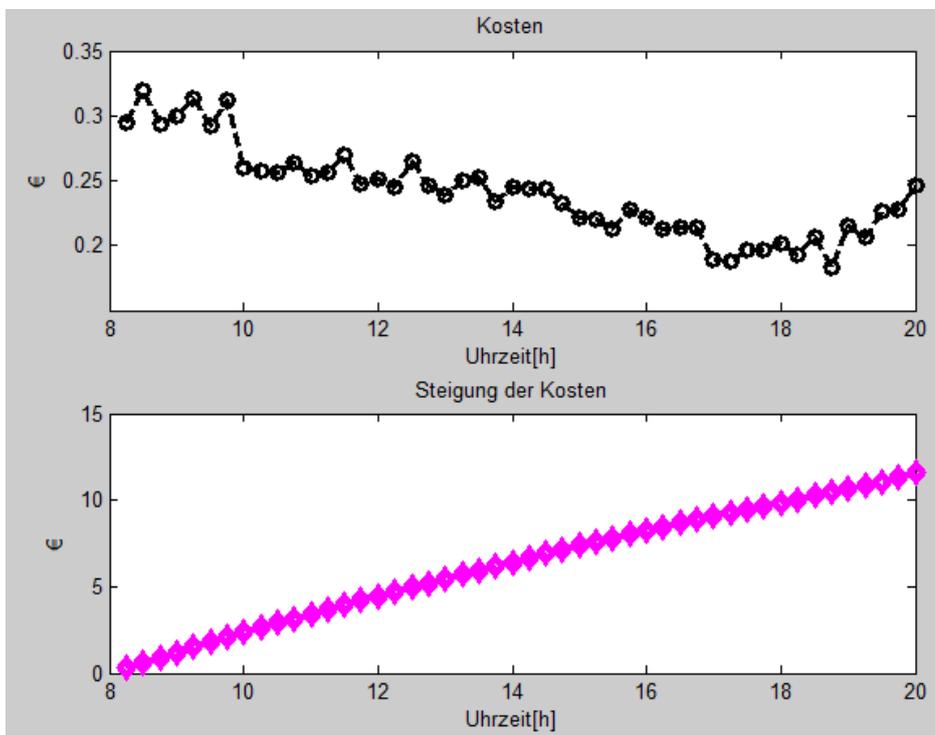


Abb. 28. Ermittlung der gesamten Kosten beim höheren Verbrauch

Bei der Kostendarstellung in Abbildung 28 ist eine sehr deutliche Steigung der Kosten zu verzeichnen. Die schwarze Kurve bleibt im Verlauf des Tages über dem durchschnittlichen Wert -Euro pro Zeitschritt-, das heißt, die Wärmepumpenanlage hat einen konstanteren Verbrauch bei einer beizubehaltenden Innentemperatur von 21°C, was stark erhöhte tägliche Kosten verursacht.

Ebenso verhält es sich mit den CO₂-Emissionen. Da die Anlage länger arbeiten muss, werden mehr Emissionen erzeugt. Abb. 29 veranschaulicht diese höheren Emissionen.

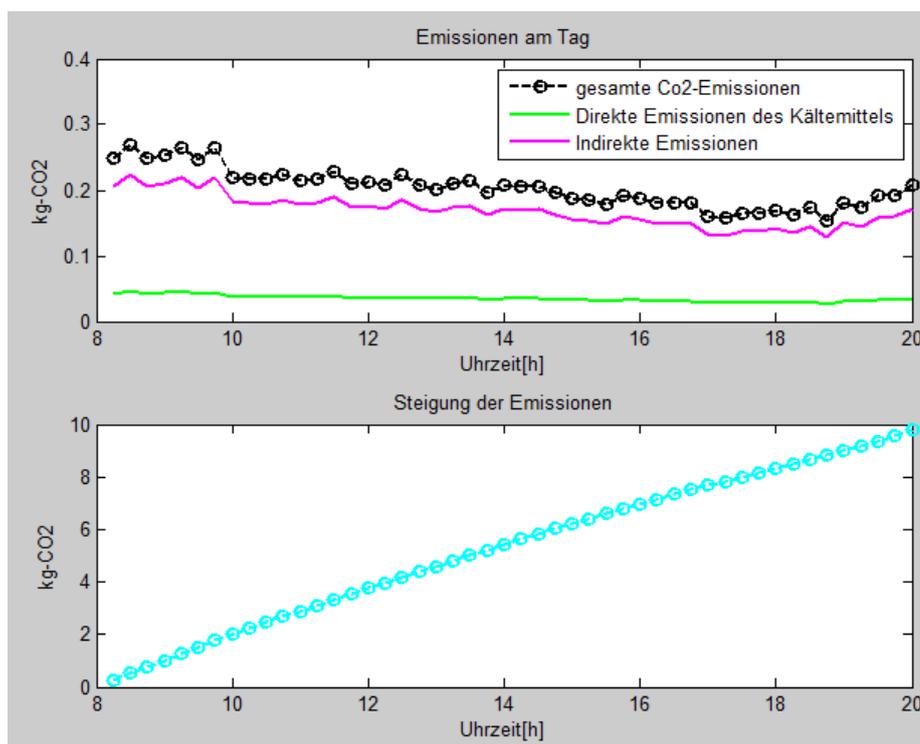


Abb. 29. Die gesamten Emissionen durch Erhöhung des Verbrauchs

Abbildungen 30 und 31 verdeutlichen den Vergleich zwischen den Kosten- und dem Emissionsbeitrag bei jeweiligem niedrigem und hohem Verbrauch im Bezug zu der gewünschten Innentemperatur.

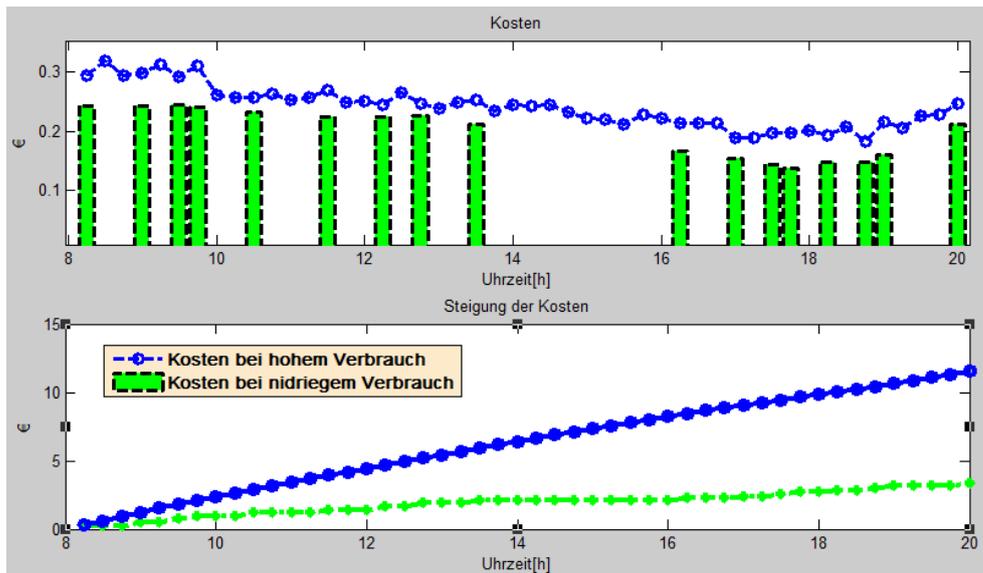


Abb. 30. Kostenvergleich nach einer Steigung des Verbrauchs für einen selben Tag

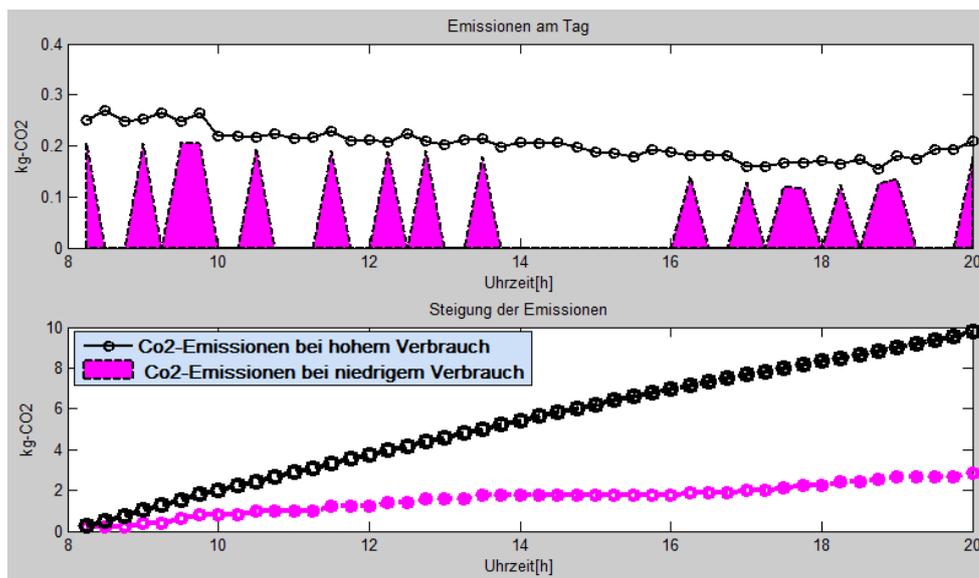


Abb. 31. CO₂-Emissionenvergleich nach einer Steigung des Verbrauchs für einen selben Tag

Bei dem Einsatz einer Wärmepumpenanlage ist die Auswahl der Wärmequelle von Bedeutung. Die Verwendung einer Luft/Luft -Wärmepumpe hat zwar eine günstige und einfache Anschaffung als Vorteil (siehe Kap. 5.2) aber langfristig höhere Kosten als eine Sole/Wasser -Wärmepumpe. Abb. 32 stellt den Temperaturverlauf bei den jeweiligen Wärmequellen dar. Diese Temperatur wird je nach Auswahl als Eingangstemperatur für den Verdampfer benutzt.

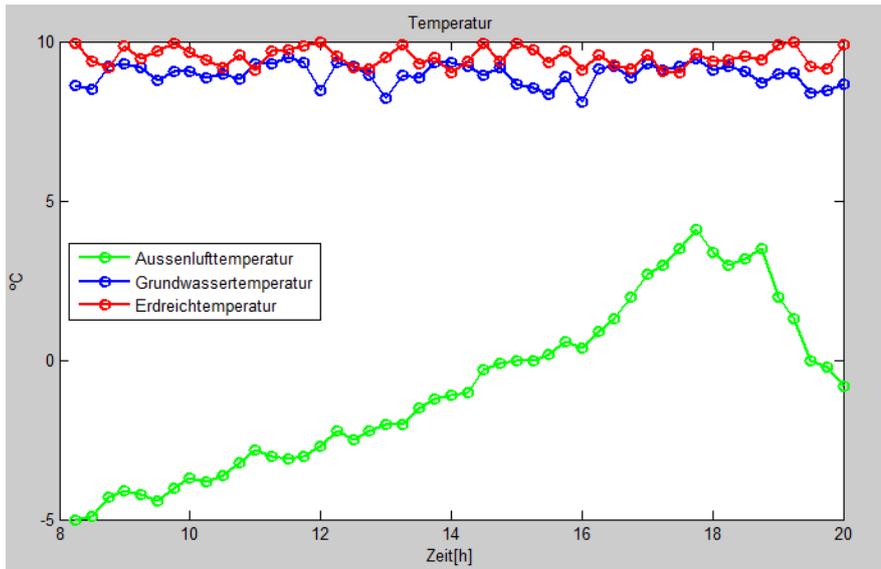


Abb. 32. Darstellung des Eingangstemperaturverlaufs aus den Wärmequellen: Erdreich, Grundwasser und Aussenluft.

Auf dem Bild wird erkennbar, dass die Temperatur aus dem Erdreich und Grundwasser stabiler und höher ist, da sie mehr thermische Energie enthält. Im Folgenden wird eine Durchführung dargestellt, in der der Wirkungsgrad, die Kosten und die Emissionen mit dem Einsatz des Erdreichs als Wärmequelle mit der Außenluftquelle verglichen werden.

In Abbildung 33 wird gezeigt, dass der COP-Wert unter Verwendung des Erdreichs als Wärmequelle höher und stabiler ist als der der Außenluft (vergleiche Abb. 25). Zudem sind die Kosten und Emissionen geringer, wie jeweils Abb. 34 und Abb. 35 darstellen.

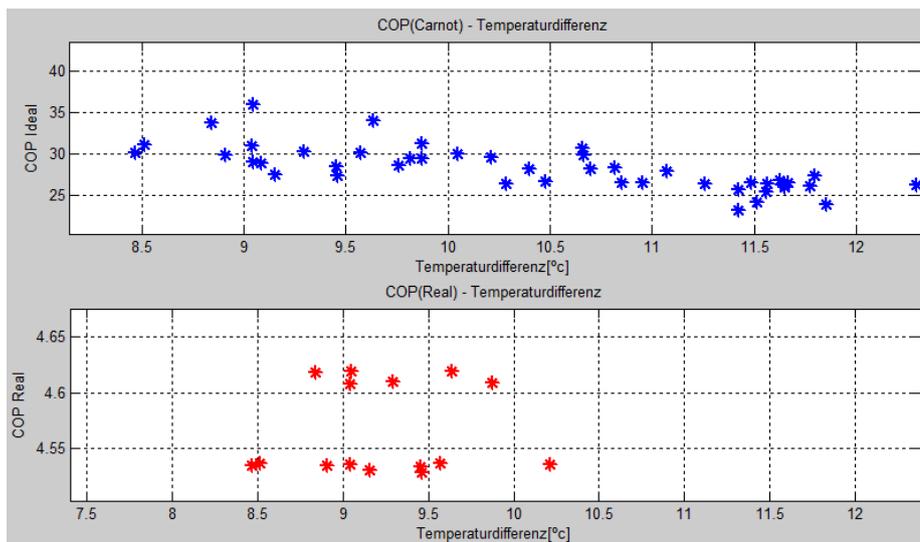


Abb. 33. COP-Werte bei Verwendung einer Erdreichwärmepumpe

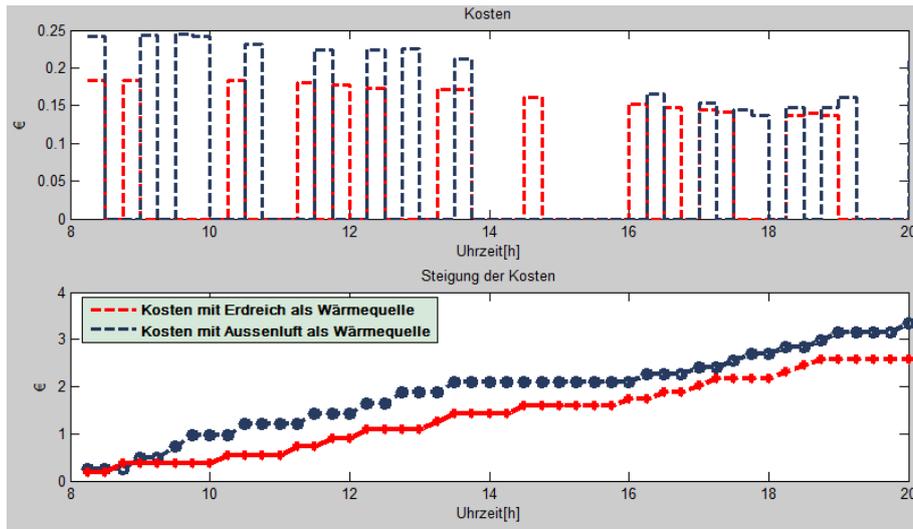


Abb. 34. Kostenvergleich am Ende des Tages durch Verwendung einer Erdreich- und Luftwärmequelle

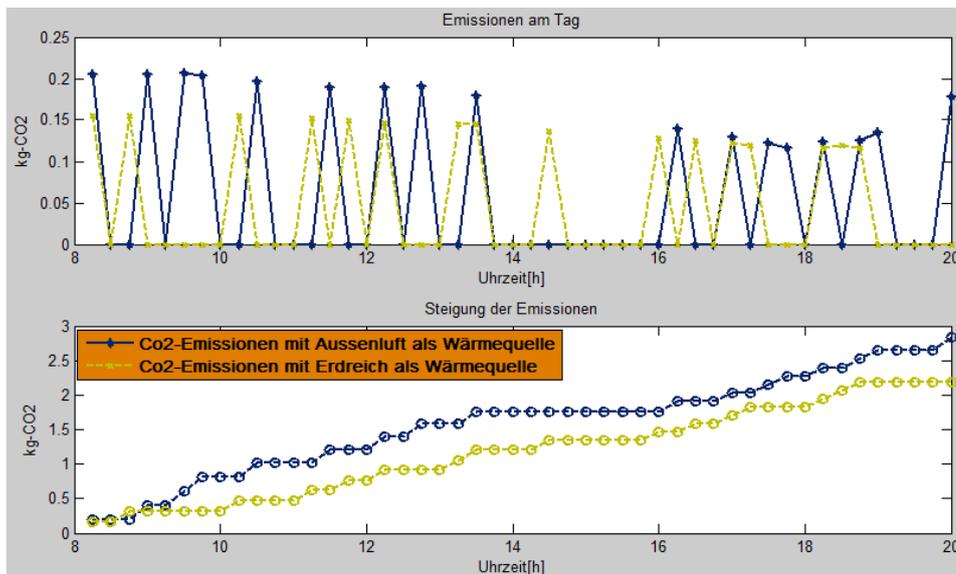


Abb. 35. CO₂-Emissionenvergleich am Ende des Tages durch Verwendung einer Erdreich- und Luftwärmequelle

Elektrische Heizung:

Die simulierte elektrische Heizung benötigt als Eingangsparameter: die Außen- und Innentemperaturen, den Wärmebedarf und die gewünschte Raumtemperatur, und ist für alle mögliche elektrische Heizungsorte geeignet. Da es im Grund nur um eine Wärmeübertragung durch einen Leiter geht. Die Simulation wird mit einem Intervall von 15 Minuten durchgeführt. Es wird

derselbe Außentemperaturverlauf und dieselbe Zeitspanne von 8 bis 20 Uhr verwendet:

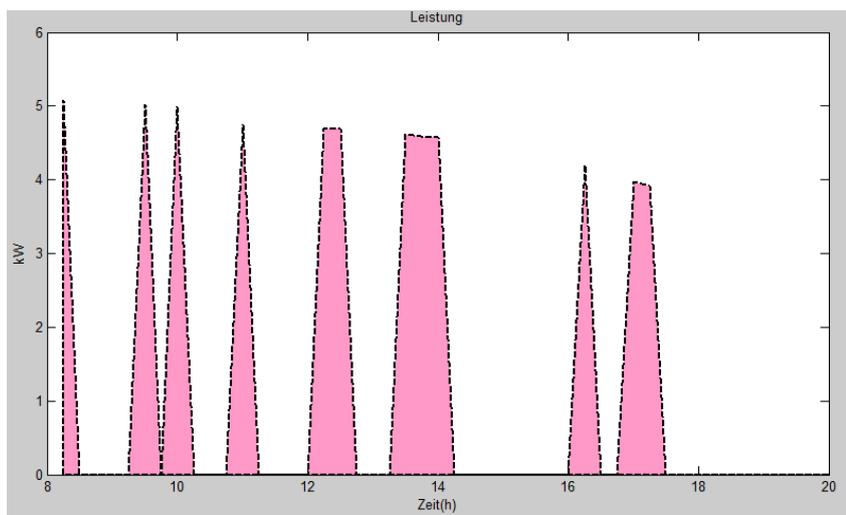


Abb. 36. Elektrische Leistung der Heizgeräte im Verlauf des Tages bei niedrigem Verbrauch

Für den Einsatz einer elektrischen Heizung, unabhängig von der Art, wird immer mit 20 Prozent mehr elektrischer Leistung als mit dem gesamten Wärmebedarf gerechnet.

Diese Heizanlage erzeugt in den Wohnhäusern keine direkten Emissionen, aber der elektrische Strom, den sie benötigt, erzeugt in dem Kraftwerke indirekt Emissionen. Abb. 37 zeigt die CO₂-Emissionen am Tag auf:

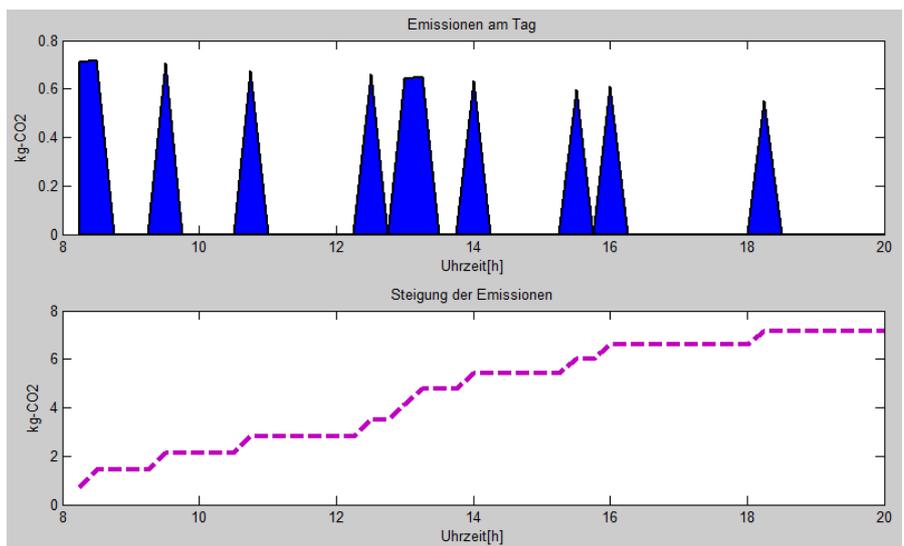


Abb. 37. Darstellung der gesamten Emissionen am Tag.

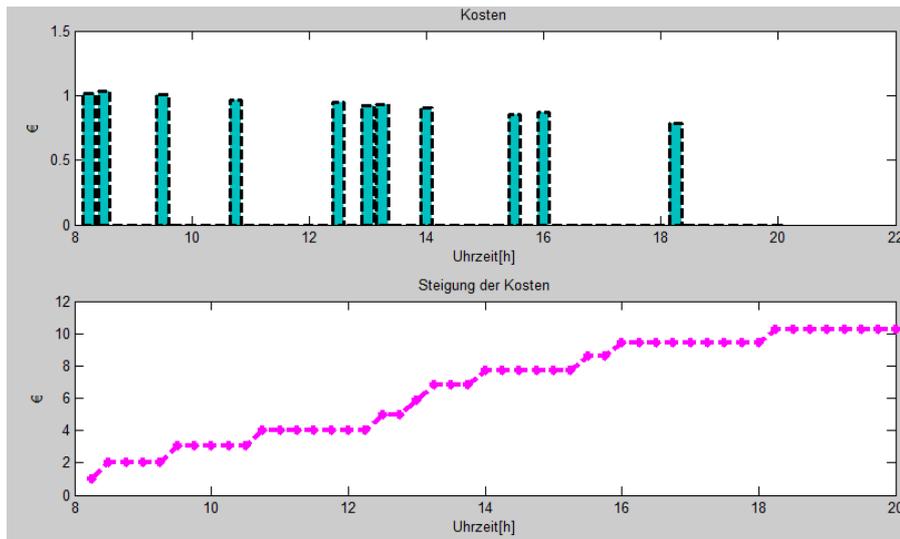


Abb. 38. Darstellung der Kosten einer elektrische Heizung in einem Wintertag.

Je nach Stromanbieter kann der Strompreis variieren. Im Durchschnitt liegt der Preis bei 0.20 €/kWh.

Die gesamten Kosten für eine Heizungsanlage sind relativ hoch. Es muss berücksichtigt werden, dass die ausschließlich elektrische Beheizung eines gesamten Wohnhauses sehr teuer werden kann.

Nachtspeicher

Für die Simulation des Ablaufs einer Nachtspeicherheizung müssen zwei Tage evaluiert werden. Die Wärme, die an dem gegenwärtigen Tag abgegeben wird, wurde durch die Wetterbedingungen des gestrigen ermittelt und mit dem elektrischen Nachtstrom der vergangenen Nacht zur Verfügung gestellt. Abbildung 39 vergleicht diese Temperaturen.

Die schwarz eingezeichnete Linie zeigt den Temperaturdurchschnitt des Tages. Auf dem Bild lässt sich erkennen, dass die gegenwärtige Temperatur kälter als die gestrige ist, wodurch ein höherer Wärmebedarf für den gegenwärtigen Tag entsteht. Abb 39 zeigt die Temperaturen auf und Abbildung 40 stellt den Wärmebedarf dar.

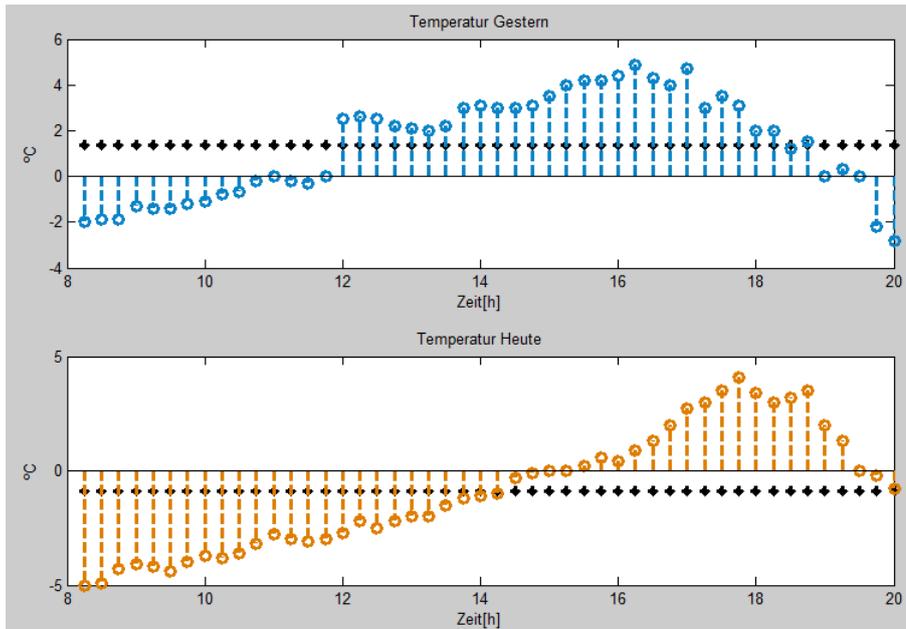


Abb. 39. Temperaturvergleich von gestern und heute.

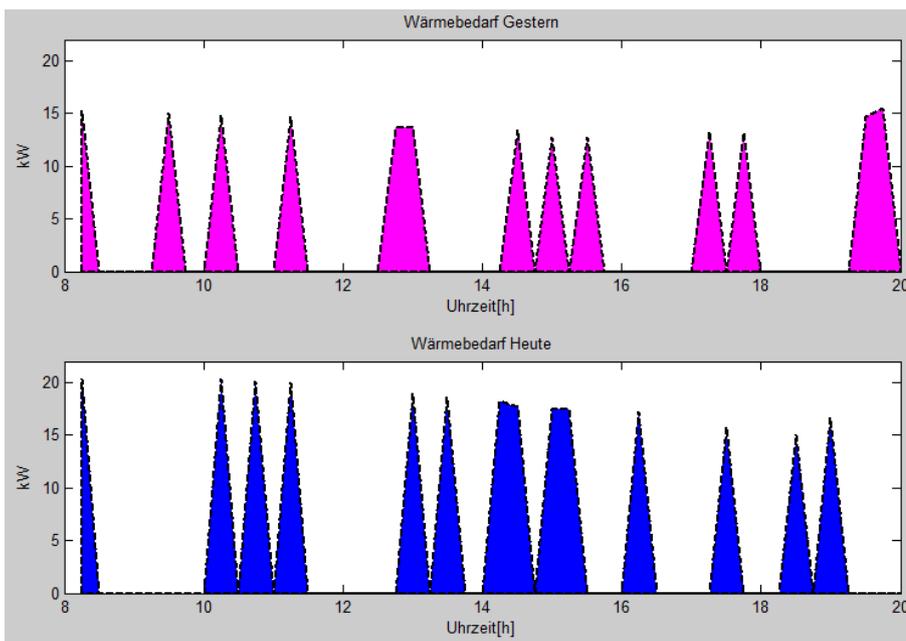


Abb 40. Gegenwärtiger und gestriger Wärmebedarf.

In Abbildung 41 wird dargestellt, wie der Nachtspeicher mit dem gestrigen Wärmebedarf durch die Nacht lädt.

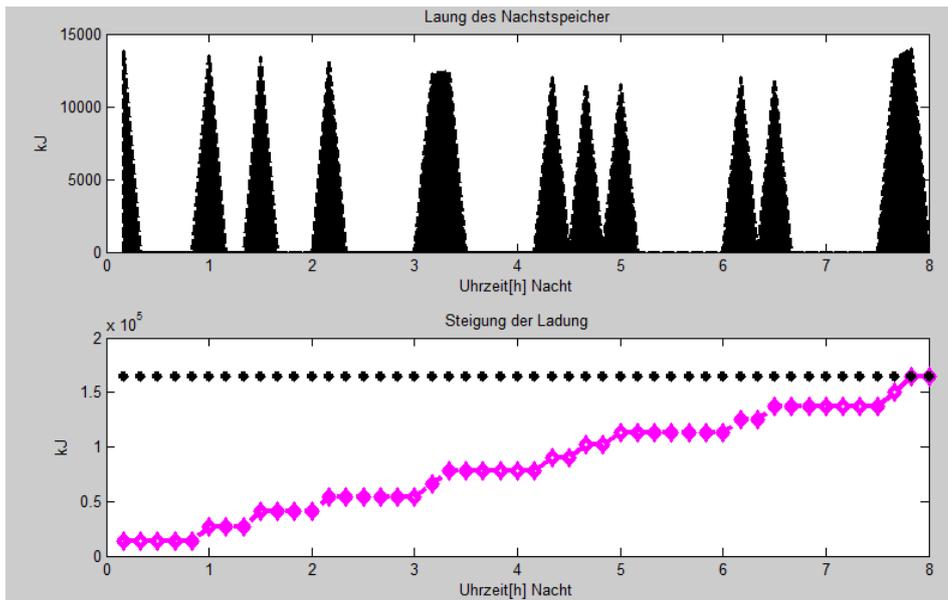


Abb. 41. Ladung des Nachtspeichers.

Ein Nachteil der Nachtspeicherheizung ist, dass die gespeicherte Wärme nur abhängig von dem gestrigen Tag ist, das heißt, wenn der Wärmebedarf des vorangegangenen Tages nicht ausreicht, muss das Heizgerät mit zusätzlicher Energie versorgt werden. Es kann eine Energieverschwendung entstehen, wenn der gestrige Wärmebedarf höher als der von heute ist. Abb. 42 vergleicht den jeweiligen gegenwärtigen Energieaufwand mit der gesamten gestrigen Ladung.

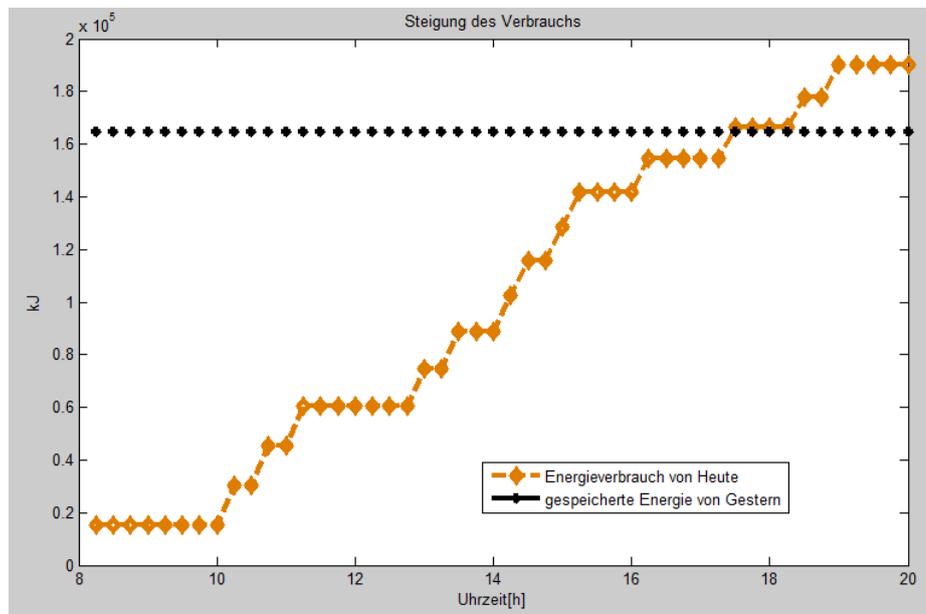


Abb. 42. Verbrauch von heute und gespeicherte Ladung von gestern.

Die Wärme für den gegenwärtigen Tag würde im idealen Fall aus der gespeicherten Wärme abgegeben, was annäherungsweise als ein konstanter Verbrauch verstanden werden kann. Diese konstante Energie wird dem Wohnhaus zugeführt und dadurch wird sie ebenso konstante Kosten und CO₂-Emissionen verursachen. Wenn diese Energie komplett genutzt ist, muss die Heizung Energie aus dem Stromnetz benutzen. Abbildungen 43-44 verdeutlichen dieses Verfahren.

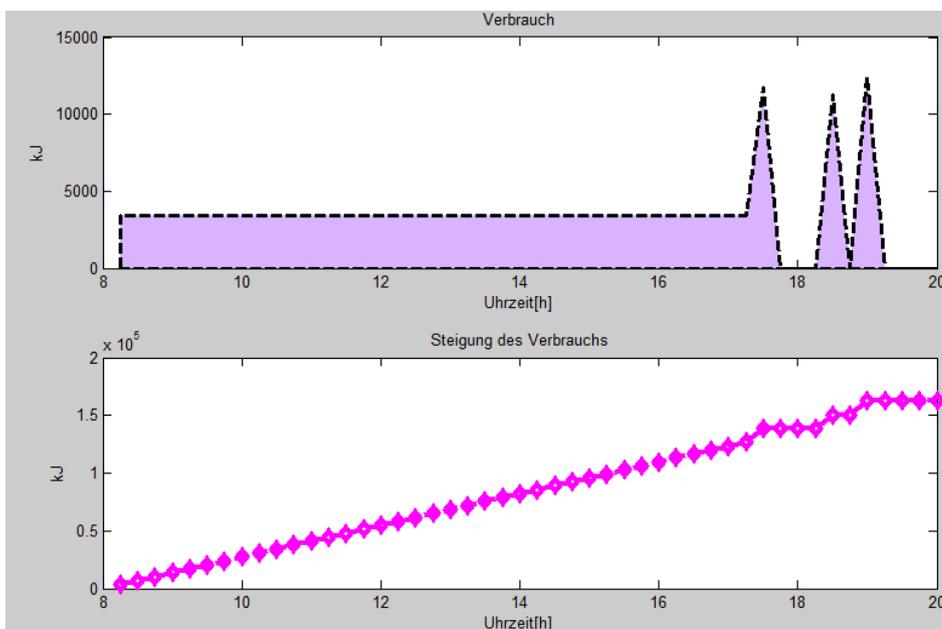


Abb. 43. Gesamte Verbrauch der Nachtspeicherheizung.

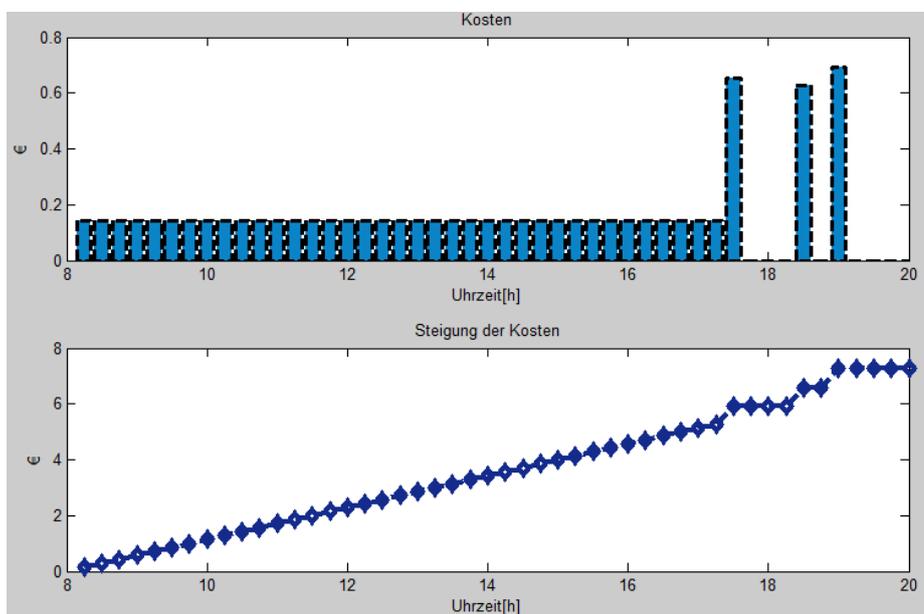


Abb. 44. Gesamte Kosten der Nachtspeicherheizung.

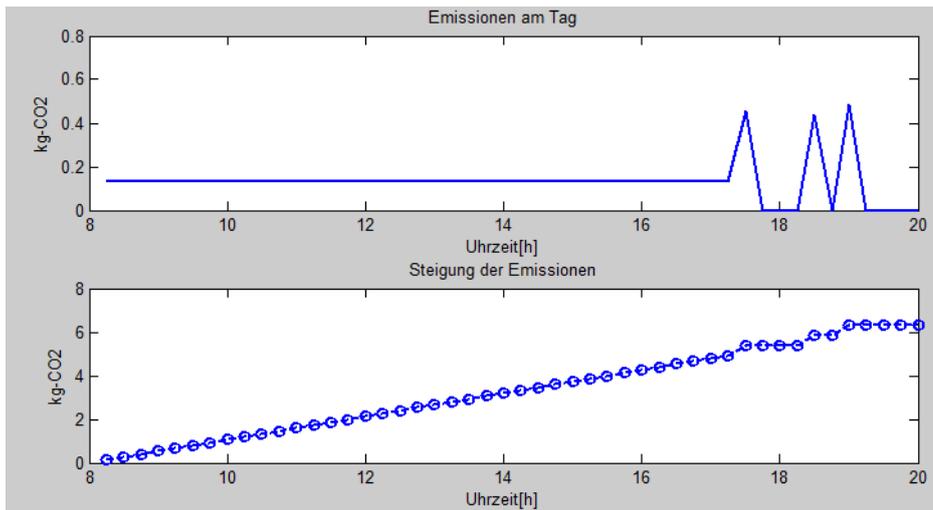


Abb. 45. Gesamte CO₂-Emissionen der Nachtspeicherheizung.

Die Kosten, die Emissionen und Energieaufwand von jeder Koppelstelle lassen sich wie folgt vergleichen:

Koppelstelle		Gesamte Energie am Tag	CO ₂ -Emissionen am Tag	Strompreis	Kosten	Abb.
Wärmepumpe		58500 kJ = 16.25kWh	2.8 kg CO ₂	0.20 €/kWh	3.25 €	21,30 ,31
Heizung		50.5 kWh	7.07 kg CO ₂	0.2 €/kWh	10.1 €	40-42
Nachtspeicher	Nacht	148000 kJ = 41 kWh	5 kg CO ₂	0.15€/kWh	6.75 €	47, 48, 49
	Tagsüber	3.88 kWh	1.2 kg CO ₂	0.2€/kWh	0.78 €	
	gesamt	44.88 kWh	6.2 kg CO ₂	7.53 €		

Tab. 17. Vergleich der Koppellen

Bei der Tabelle 17 ist zu sehen, wie der Einsatz von Elektrowärmepumpen am günstigsten und vernünftigsten ist, da sie weniger Antriebsenergie benötigt und dadurch erzeugt sie sehr wenig CO₂- Emissionen. Mit den erneuerbaren Energien kann sich der Einsatz einer von den Koppelstellen lohnen um mehr Einsparung der Kosten und wenig Umweltschaden zu generieren.

11. Fazit

Ich bin allerdings der Ansicht, dass sich der Einsatz der elektrischen Wärmepumpe und der Elektroheizgeräte in der Heiztechnik nur mit Verwendung der erneuerbaren Energien lohnt. Es sollte nicht vergessen werden, dass die fossilen Brennstoffe immer teurer und irgendwann aufgebraucht werden können. Außerdem habe ich nach den Ergebnissen nachgewiesen, dass die Heizungsanlagen sehr viele CO₂-Emissionen in Verknüpfung mit dem Stromsektor erzeugen. Die Einsparung der Kosten und Senkung der Emissionen erfolgen durch Verringerung des Grundverbrauches eines Gebäudes, was auch eine Grundvoraussetzung für die Lebensdauer und Effizienz ist.

Die Ergebnisse der Simulation sind nicht so weit von den in den realen Heizanlagen entfernt und dienen zur Planung, Einsparung und Abschätzung für eine künftige Anschaffung einer solchen Koppelstelle. Nach den Ergebnissen der Simulation ist ersichtlich, dass der Einsatz einer Heizungsanlage mit einer elektrischen Wärmepumpe mehr Vorteile gegenüber einer mit einem konventionellen Elektroheizgerät hat. Die Wärmepumpe nutzt weniger Antriebsenergie und kann sowohl für Heizarbeit als auch für Kühlarbeit genutzt werden. Darüber hinaus habe ich überprüft, wie das Erdreich als Energiequelle für eine Wärmepumpenanlage zu einem besseren Wirkungsgrad und der Senkung der Kosten beiträgt. Die Anschaffungskosten einer Wärmepumpenanlage sind zwar hoch, aber sehr vernünftig in Hinsicht auf die langfristige Einsparung der Kosten und der Senkung des CO₂-Ausstosses.

Der Einsatz der Speicherheizungen ist essentiell für die Einsparung der Kosten, da Sie verbilligten elektrischen Strom speichern. Die Betriebskosten und CO₂-Emissionen durch ihre Verwendung sind zwar sehr hoch, aber im Gegensatz zu konventionellen Elektroheizgeräten sind diese bei gleichen Emissionen günstiger. Es empfiehlt sich der Einsatz der elektrischen Nachtspeicherheizung mit Strom aus natürlichen Energiequellen und mit einer sehr genauen Steuerung.

12. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Darstellung der Kopplungen.....	3
Abb. 2: Schaltbild einer Wärmepumpe.....	14
Abb. 3: Wärmepumpenanlage mit Außenluft als Wärmequelle.....	19
Abb. 4: Wasser/Wasser –Wärmepumpenanlage.....	21
Abb. 5: Sole/ Wasser –Wärmepumpenanlage mit Erdkollektoren.....	22
Abb. 6: Sole/ Wasser –Wärmepumpenanlage mit Erdsonden.....	23
Abb. 7: Funktionsschema des Wärmepumpenkreisprozesses.....	28
Abb. 8: Darstellung des Kältemittelprozesses auf dem Druck- Enthalpie- Diagramm.	29
Abb. 9: Darstellung der Unterkühlung und der Überhitzung.....	29
Abb. 10: Kältemittelverfahren auf dem Mollier-Diagramm.....	36
Abb. 11: Isobare und isenthalpe Linien auf dem Mollier-Diagramm.	36
Abb. 12: Sättigungslinien und kritischer Punkt des Mollier- Diagramms.....	37
Abb. 13: Isotherme Linien auf dem Mollier-Diagramm.....	38
Abb. 14: Isentrope Linien auf dem Mollier-Diagramm.....	38
Abb. 15: Temperatur-Entropie-Diagramm.....	41
Abb. 16: Temperaturen und Drücke des Verdampfers und Kondensators.....	61

Abb. 17: Darstellung des Außentemperaturverlaufs.....	68
Abb. 18: Energieaustausch in dem Wärmepumpensystem.....	68
Abb. 19: Darstellung der verschiedenen Wärmeverluste und Wärmebedarf.....	69
Abb. 20: Gesamter Verbrauch im Verlauf des Tages.....	70
Abb. 21: Verlauf des Massenstroms in dem Kreisprozess.....	70
Abb. 22: Darstellung der Leistung von jedem Bauteil.....	71
Abb. 23: COP-Wertänderung bei jedem Zeitschritt.....	71
Abb. 24: Wirkungsgrad und Gütegrad bei jedem Zeitschritt.....	72
Abb. 25: Abhängigkeit des COP-Wertes von der Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innentemperatur.	72
Abb. 26: Darstellung der gesamten CO ₂ -Emissionen durch den Ablauf der Wärmepumpenanlage.....	73
Abb. 27: Ermittlung der gesamten Kosten am Ende des Tages.....	73
Abb. 28: Ermittlung der gesamten Kosten beim höheren Verbrauch.....	74
Abb. 29: Die gesamten Emissionen durch Erhöhung des Verbrauchs.....	75
Abb. 30: Kostenvergleich nach einer Steigung des Verbrauchs für einen gleichen Tag.....	76
Abb. 31: CO ₂ -Emissionenvergleich nach einer Steigung des Verbrauchs für einen selben Tag.....	76
Abb. 32: Darstellung des Eingangstemperaturverlaufs aus den Wärmequellen: Erdreich, Grundwasser und Außenluft.....	77
Abb. 33: COP-Werte bei Verwendung einer Erdreichwärmepumpe.....	77

Abb. 34: Kostenvergleich am Ende des Tages durch Verwendung einer Erdreich- und Luftwärmequelle.....	78
Abb. 35: CO2-Emissionenvergleich am Ende des Tages durch Verwendung einer Erdreich- und Luftwärmequelle.....	78
Abb. 36. Elektrische Leistung der Heizgeräte im Verlauf des Tages bei niedrigem Verbrauch.....	79
Abb. 37: Darstellung der gesamten Emissionen am Tag.....	79
Abb. 38: Darstellung der Kosten einer elektrischen Heizung an einem Wintertag.....	80
Abb. 39: Temperaturvergleich von gestern und heute.....	81
Abb 40: Gegenwärtiger und gestriger Wärmebedarf.....	81
Abb. 41: Ladung des Nachtspeichers.....	82
Abb. 42: Verbrauch von heute und gespeicherte Ladung von gestern....	82
Abb. 43: Gesamter Verbrauch der Nachtspeicherheizung.....	83
Abb. 44: Gesamte Kosten der Nachtspeicherheizung.....	83
Abb. 45: Gesamte CO2-Emissionen der Nachtspeicherheizung.....	84

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Eigenschaften des Wohnhauses.....	9
Tab. 2: Wärmedurchgangskoeffizient der Bauelemente des Hauses.....	10
Tab. 3: Produkt von Flächen und Durchgangskoeffizienten.....	10
Tab. 4: Heizleistung der Hausgeräte.....	12
Tab. 5: Kurzbeschreibung einer Wärmepumpenanlage.....	18
Tab. 6: Beschreibung der Kennzeichen für die Kurzbeschreibung.....	18
Tab. 7: Eigenschaften der Kältemittel.....	27
Tab. 8: Beschreibung eines geschlossenen Kreisprozesses nach Carnot.....	39
Tab. 9: Beispiele für Stromverbrauch und Stromkosten verschiedener Elektroheizungen für unterschiedliche Heizeinsätze.....	54
Tab. 10: Kosten verschiedener Fußbodenheizungen für ein Jahr.....	55
Tab. 11: Kosten von verschiedenen Heizgeräten.....	56
Tab. 12: gesättigte Werte des Kältemittels R22.....	99
Tab. 13: Beschaffenheiten des überhitzten Dampfs 1.....	100
Tab. 14: Beschaffenheiten des überhitzten Dampfs 2.....	101
Tab. 15: Beschaffenheiten des überhitzten Dampfs 3.....	102
Tab. 16: Beschaffenheiten des überhitzten Dampfs 4.....	103
Tab. 17: Vergleich der Koppenstellen.....	84

13. Nomenklatur und Formelverzeichnis

Nomenklatur

- α Nutzungsfaktor der Beleuchtung.
- α_k Wärmeübergangskoeffizient ($kW/m^2 \cdot K$)
- Δ Differenz
- ΔT Temperaturdifferenz an dem Heizelement ($^{\circ}C$)
- ΔW Arbeitsdifferenz (kJ)
- δQ Wärmeänderung (kJ)
- δW Arbeitsänderung (kJ)
- σ Stefan-Boltzmann-konstante ($5.67 \cdot 10^{-11} kW/m^2 \cdot K^4$)
- ρ_i, ρ_o Ein- und Ausgangsdichte des Fluids (kg/m^3)
- ρ_{km} Dichte des Kältemittels (kg/m^3)
- ρ_{luft} Dicht der Luft ($1.22 kg/m^3$).
- ϑ spezifisches Volumen (m^3/kg)
- λ Wärmeleitfähigkeit ($kW/m \cdot K$)
- A Wärmetauschfläche (m^2)
- A_l Etagenfläche (m^2).
- A_v Öffnungsquerschnitt des Drosselventils (mm)
- COP_k Coefficient of Performance für Kühlarbeit
- COP_w Coefficient of Performance für Heizarbeit
- C_{km} Menge des Kältemittels ($kg \text{ Kältemittel} /kW$)
- C_p Spezifische Wärme der Luft ($1.00467 kJ/kg \cdot K$).
- C_v Durchflusszahl des Drosselventils
- dE Energiedifferential (kJ)
- E_D Direkte Emissionen aus dem Kältemittel (kg_{CO_2})
- E_I Indirekte Emissionen durch Stromerzeugung (kg_{CO_2})
- E_o, E_i Ein- und Ausgangsenergie des Fluids (kJ)
- E_{CO_2} Gesamte CO₂- Emissionen (kg_{CO_2})
- e Breite der Schicht des Bauteils(m).
- ϵ Emissionsgrad
- ϵ Strompreis ($€/kWs$)
- e Wanddicke (m)
- f Nutzungsfaktor einer Heizungsanlage
- g Gravitationsbeschleunigung (m/s^2)
- GWP Treibhauspotential ($kg CO_2/kg \text{ Kältemittel}$)
- h_1 Ausgangsenthalpie des Verdampfers (kJ/kg)
- h_2 Eingangsenthalpie des Kondensators (kJ/kg)

- h_3 Ausgangsenthalpie des Kondensators (kJ/kg)
- h_4 Eingangsenthalpie des Verdampfers (kJ/kg)
- JAZ_{jahr} Jahresarbeitszahl
- κ Kosten (€)
- KE Kinetische Energie (kJ)
- \dot{m}_i, \dot{m}_o Ein- und Ausgangsmassenstrom des Fluids (kg/s)
- \dot{m}_l Massenstrom der erneuerten Luft (kg/s).
- \dot{m} Massenstrom eines Fluids (kg/s)
- m_l Masse der erneuerten Luft (kg).
- η_G Gütegrad
- η_L Wirkungsgrad für Heizen
- P Elektrische Leistung des Heizgerätes (kW)
- PE Potentielle Energie (kJ)
- P_{high} Höchste Druck am Verdichter ($kg/m \cdot s^2$)
- Pe_i CO_2 pro Verbrauchte Energie pro Secunde ($kg CO_2/kWs$)
- P_i, P_o Ein- und Ausgangsdruck des Fluids ($kg/s^2 \cdot m$)
- P_{low} Nidrigste Druck am Verdichter ($kg/m \cdot s^2$)
- \dot{Q}_{c_i} Abgegebener Wärmebedarf pro Tag (kW)
- \dot{Q}_C Leistung aus der warmen Quelle (kW)
- \dot{Q}_F Leistung aus der kalten Quelle (kW)
- $\dot{Q}_{Geräte}$ Wärme aus den Gäreten (W)
- \dot{Q}_{Latent} Latentwärme einer Person (W)
- \dot{Q}_{Lei} Wärmestrom durch Wärmeleitung (kW)
- \dot{Q}_{Licht} Lichtwärme (W)
- \dot{Q}_{Mensch} gesamte Wärme einer Person (W)
- \dot{Q}_{Raum} Raumwärmeverluste (kW)
- \dot{Q}_e zugeführte Wärme aus der Umgebung (kW)
- \dot{Q}_{gew} gesamte Wärmegewinne (kW)
- \dot{Q}_{ko} Wärmestrom durch Konvektion (kW)
- $\dot{Q}_{lüf}$ Lüftungsheizlast (kW)
- \dot{Q}_s Wärmebedarf (kW)
- $\dot{Q}_{sensibel}$ Sensibelwärme einer Person (W)
- \dot{Q}_{st} Wärmestrom durch Strahlung (kW)
- \dot{Q}_{tra} Transmissionverluste (W).
- q_l Durchschnittliche Lichtenergie (W/m^2)
- R_t gesamte Schichtwiderstand ($m^2 \cdot K/W$).
- R Widerstand des Heizgerätes (Ω)
- t Zeitdauer (s)
- T_F Aussentemperatur oder Temperatur der kalten Quelle ($^{\circ}C$).
- T_C Innentemperatur oder Temperatur der warmen Quelle ($^{\circ}C$).
- T_i Innentemperatur des Aussenbauteils ($^{\circ}C$).
- T_{med} durchschnittliche Aussentemperatur ($^{\circ}C$)

- T_{nc} Mindestaussentemperatur für Heizarbeit ($^{\circ}\text{C}$)
- T_o Aussentemperatur des Aussenbauteils ($^{\circ}\text{C}$).
- t_L Ladungsdauer (s)
- U Innere Energie (kJ)
- U Wärmedurchgangskoeffizient ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$).
- U_s Angelegte Spannung (V)
- u_i, u_o spezifische innere Ein- und Ausgangsenergien des Fluids (kJ/kg)
- V_i, V_o Ein- und Ausgangsvolumen des Fluids (m^3)
- V_{luft} Volumen der erneuten Luft (m^3).
- v_i, v_o Ein- und Ausgangsgeschwindigkeit des Fluids (m/s)
- \dot{W}_{ki} Elektrische Leistung des Kompressors pro Tag (kW)
- \dot{W}_T gesamte Arbeit des Systems (kW)
- \dot{W}_c gesamte zugeführte Arbeit (kW)
- \dot{W}_c externe zugeführte Arbeit (kW)
- \dot{W}_i, \dot{W}_o Ein- und Ausgangsarbeitsstrom des Fluids (kW)
- \dot{W}_k Elektrische Leistung des Kompressors (W)
- \dot{W}_s zugeführte elektrische Leistung (kW)
- z_o, z_i Ein- und Ausgangshöhe des Fluids (m)

Formelverzeichnis

Nr.	Formel	SI-Einheit	Seite
1	$\dot{Q}_{tra} = U \cdot A \cdot (T_o - T_i)$	[kW]	7
	$U = \frac{1}{R_t}$	[W/m ² · K]	
2	$\dot{Q}_{tra} = \sum U_i \cdot A_i \cdot (T_o - T_i)$	[kW]	8
3	$\dot{Q}_{lüf} = \dot{m}_l \cdot c_p \cdot (T_o - T_i)$	[kW]	8
	$\dot{m}_l = \frac{V_{\text{luft}} \cdot \rho_{\text{luft}}}{3600 \text{ sec}}$	[kg/s]	
4	$\dot{Q}_{gew} = \dot{Q}_{\text{Licht}} + \dot{Q}_{\text{Geräte}} + \dot{Q}_{\text{Mensch}}$	[kW]	9
5	$\dot{Q}_{\text{Licht}} = q_l \cdot A_l \cdot \alpha$	[kW]	9

6	$\dot{Q}_{Geräte} = (\sum \text{Heizlast eines Gerätes}) \cdot \alpha$	[kW]	9
7	$\dot{Q}_{Mensch} = \dot{Q}_{sensibel} + \dot{Q}_{Latent}$	[kW]	9
8	$\dot{Q}_{Raum} = \dot{Q}_{tra} + \dot{Q}_{lüf} - \dot{Q}_{gew}$	[kW]	9
9	$dE = \delta Q + \delta W$	[kJ]	30
10	$dE = E_o - E_i$	[kJ]	30
11	$E = KE + PE + U$	[kJ]	31
	$\Delta E = \Delta KE + \Delta PE + \Delta U$	[kJ]	
12	$\frac{dKE}{dt} + \frac{dPE}{dt} + \frac{dU}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$	[kW]	31
13	$\frac{dKE}{dt} = \frac{1}{2} \cdot (\dot{m}_o \cdot v_o^2 - \dot{m}_i \cdot v_i^2)$	[kW]	31
14	$\frac{dPE}{dt} = g \cdot (\dot{m}_o \cdot z_o - \dot{m}_i \cdot z_i)$	[kW]	31
15	$\frac{dU}{dt} = \dot{m}_o \cdot u_o - \dot{m}_i \cdot u_i$	[kW]	31
16	$\dot{W} = \dot{W}_T = \dot{W}_c + \dot{W}_o - \dot{W}_i$	[kW]	32
17	$\Delta W = W_o - W_i = \int_{V_i}^{V_o} P \cdot dV = P_o \cdot V_o - P_i \cdot V_i$	[kJ]	32
	$\Delta \dot{W} = \dot{W}_o - \dot{W}_i = P_o \cdot \dot{V}_o - P_i \cdot \dot{V}_i =$	[kW]	
18	$V_i = \frac{m_i}{\rho_i} \rightarrow \dot{V}_i = \frac{\dot{m}_i}{\rho_i}$	[m ³ /s]	32
	$\Delta \dot{W} = \dot{W}_o - \dot{W}_i = P_o \cdot \dot{m}_o \cdot \vartheta - P_i \cdot \dot{m}_i \cdot \vartheta$	[kW]	
19	$\dot{W}_T = \dot{W}_c + P_o \cdot \vartheta \cdot \dot{m}_o - P_i \cdot \vartheta \cdot \dot{m}_i$	[kW]	32
20	$h = u + p \cdot \vartheta$	[kJ/kg]	33

21	$\dot{W}_T = \dot{W}_c + (h_o - u_o) \cdot \dot{m}_o - (h_i - u_i) \cdot \dot{m}_i$	[kW]	33
22	$\frac{1}{2} \cdot (\dot{m}_o \cdot v_o^2 - \dot{m}_i \cdot v_i^2) + g \cdot (\dot{m}_o \cdot z_o - \dot{m}_i \cdot z_i) + \dot{m}_o \cdot u_o - \dot{m}_i \cdot u_i = \dot{Q} - [\dot{W}_c + (h_o - u_o) \cdot \dot{m}_o - (h_i - u_i) \cdot \dot{m}_i]$	[kW]	33
23	$\frac{dm}{dt} = \sum_i \dot{m}_i - \sum_o \dot{m}_o = 0$	[kg/s]	33
	$\dot{m}_i = \dot{m}_o = \dot{m}$	[kg/s]	
24	$\frac{dE_c}{dt} = \dot{Q}_c - \dot{W}_c + \dot{m} \cdot \left[(h_i - h_o) + \left(\frac{v_i^2 - v_o^2}{2} \right) + g \cdot (z_i - z_o) \right]$	[kW]	33
25	$\dot{W}_k = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1)$	[kW]	34
26	$0 = \dot{m} \cdot (h_i - h_o) \rightarrow h_i = h_o$	[kJ/kg]	34
27	$\dot{Q}_c = \dot{m} \cdot (h_o - h_i)$	[kW]	35
28	$\dot{Q}_e = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4)$	[kW]	35
29	$\dot{Q}_s = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3)$	[kW]	35
30	$\eta_c = \frac{T_c}{T_c - T_F}$		40
31	$\dot{Q}_C = \dot{Q}_F + \dot{W}_S$	[kW]	41
32	$COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}}$		42
33	$COP_w = \frac{\dot{Q}_F + \dot{W}_S}{\dot{W}_S}$		42
34	$COP_k = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{W}_S}$		42
35	$\eta_{cop} = \frac{T_c}{T_c - T_F}$		43

36	$\eta_G = \frac{COP}{\eta_{cop}}$		43
37	$\eta_L = \frac{\text{Nutzleistung}}{\text{Antriebsleistung}} = \frac{\dot{Q}_s}{\dot{W}_k}$		44
38	$JAZ_{\text{jahr}} = \frac{\sum \dot{Q}_{si}}{\sum \dot{W}_{ki}}$		44
39	$\dot{Q}_{Lei} = A \cdot \frac{e}{\lambda} \cdot \Delta T$	[kW]	45
40	$\dot{Q}_{st} = A \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_o^4 - T_i^4)$	[kW]	45
41	$\dot{Q}_{ko} = A \cdot \alpha_k \cdot \Delta T$	[kW]	46
42	$P = \frac{U_s^2}{R}$	[kW]	47
43	$\text{Aufladung} = \frac{24 \cdot \dot{Q}_s \cdot (T_{nc} - T_{med}) \cdot \alpha}{(T_c - T_f) \cdot t_L}$	[kW]	50
44	$\text{Verbrauch} = \dot{W} \cdot t$	[kWh]	52
45	$\text{Kosten} = \text{Verbrauch} \cdot \text{Preis} = \frac{\dot{Q}_s \cdot t \cdot \text{Preis}}{JAZ}$	[€]	52
46	$\kappa = \dot{W}_s \cdot \epsilon \cdot t$	[€]	56
47	$E_{CO2} = E_D + E_I$	[kgCO2]	59
48	$E_D = GWP \cdot f \cdot C_{km}$	[kgCO2]	59
49	$E_I = Pe_i \cdot \dot{W}_s \cdot t$	[kgCO2]	59

14. Literaturverzeichnis

[A]. Tiator, Schenker. "Wärmepumpen, Wärmepumpenanlagen". Verlag: Vogel, 2007. ISBN: 978-3-8343-3059-8.

[A1]Seiten 161-163, [A2]Seiten 85-87, [A3]Seiten 93 -126, [A5]Seiten 101-130

[B]. Karl Ochsner. "Wärmepumpen in der Heizungstechnik. Praxishandbuch für Instalateure und Planer". 5. Auflage. Verlag: C.F. Müller, 2009. ISBN: 978-3-7880-7845-4.

[B1]Seiten 13-14, [B2]Seiten 13-14, [B3]Seiten 16-17, [B4] Seiten 154-156. 163-168

[C]. Herbert Kirn. " Wärmepumpen, Band 1: Grundlagen der Wärmepumpentechnik". 6. Auflage. Verlag: C.F. Müller Karlsruhe, 1983. ISBN: 3-7880-7209-1.

[C1]Seiten 163-180, [C2]Seiten 85-98, [C3]Seiten 184-192, [C4]Seiten 193-197, [C5]Seiten 6-10, [C6]Seiten 16-17

[C]. Herbert Kirn, Alfred Hadenfeldt. "Band 2: Anwendung der Elektrowärmepumpe". 5. Auflage. Verlag: C.F. Müller Karlsruhe, 1986 - 1987. ISBN: 3-7880-7273-3.

[C7]Seiten 6-9

[D]. Jürgen Bonin. "Wärmepumpen, Fehler vermeiden bei Planung, Installation und Betrieb". Verlag: Beuth, Fraunhofer IRB, 2015. ISBN: 978-3-410-25515-4, 978-3-8167-9454-7.

[D1]Seite 80, [D2]Seite17, [D3]Seite18, [D3]Seite15, [D4]Seite 8, [D5]Seiten12-14

[E]. Stefan Sobotta. "Praxis Wärmepumpe, Technik, Planung und Installation". 2. Auflage. Verlag: Beuth, 2015. ISBN: 978-3-410-23362-6.

[E2]Seiten30-33, [E3]Seiten60-61 und Seiten 98-100

[F]. Andreas Hauer, Stefan Hiebler, Manfred Reuss. "Wärmespeicher". 5. Auflage. Verlag: Fraunhofer IRB, 2013. ISBN: 978-3-8167-8366-4.

[F1]Seite11, Seiten 14-17

[G]. Baumann, Müller, Jürgen. "Wärmepumpen: Heizen mit Umweltenergie". 4. Auflage. Verlag: Solarpraxis AG, 2007. ISBN: 978-3-934595-60-6.

[G1]Seite11, [G2]Seiten66-75

[H]. Cube, Steimle, Kunis (Hrsg.). "Lehrbuch der Kältetechnik, Band 1". 4. Auflage. Verlag: C.F. Müller, 1997. ISBN: 3-7880-7509-0.

[H1]Seiten1223-1226, [H2]Seiten 233-250

[I]. Peter Borstelmann, Peter Rohne. "*Handbuch der elektrischen Raumheizung*". 7. Auflage. Verlag: Hüthig, 2000. ISBN: 3-7785-2192-6.
[i1]Seiten 27-30, [i2]Seiten 87-91, [i3]Seite 118, [i4]Seiten 97-100

[J]. Recknagel, Sprenger, Schramek. "*Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*". Verlag: Oldenbourg Industrieverlag, 2007. ISBN: 3-8356-3104-7.
[J1]Seiten 356-362, [J2] Seiten 507.566-567

[K]. Michael Sterner, Ingo Stadler. "*Energiespeicher: Bedarf, Technologien, Integration*". Verlag: Springer, 2014. ISBN: 978-3-642-37379-4.
[K1]Seite 705, 711-712

[L]. Michael J. Moran, Howard N. Shapiro. "*Fundamentals of Engineering Thermodynamics*". 4. Auflage. Verlag: John Wiley & Sons, 2004. ISBN: 978-0471317135.
[L1]Seite 223

Internetseiten

[1] <http://www.energiesparen-im-haushalt.de/energie/bauen-und-modernisieren/hausbau-regenerative-energie/energiebewusst-bauen-wohnen/emission-alternative-heizung/heizen-mit-erdwaerme/arten-von-waermepumpen.html> (Webseite letztes mal am 27.052016 besucht)

[2] <http://www.energie-experten.org/heizung/waermepumpe/technik/verdichter.html> (Webseite letztes mal am 27.052016 besucht)

[3] <http://www.indubel.com.ar/pdf/gases/refrigerantes.pdf> (Webseite letztes mal am 27.052016 besucht)

[4] <https://www.downloads.siemens.com/download-center/Download.aspx?pos=download&fct=getasset&id1=8358> (Webseite letztes mal am 27.052016 besucht)

[5] http://www.treffpunkt-kaelte.de/kaelte/de/de_start.html (Webseite letztes mal am 27.052016 besucht)

[6] <http://www.tuairacondicionadoweb.com/diagrama-de-mollier/> (Webseite letztes mal am 27.052016 besucht)

[7] <http://www.heizungsfinder.de/waermepumpe/wirtschaftlichkeit/cop-wert> (Webseite letztes mal am 27.052016 besucht)

[8] <http://www.elektroflachheizung.de/elektroheizung-produktinformation/aufbau-und-funktionsweise/> (Webseite letztes mal am 27.052016 besucht)

[9] <http://www.energie-experten.org/heizung/elektroheizung/direktheizgeraete.html> (Webseite letztes mal am 27.052016 besucht)

[10] <http://www.energie-experten.org/heizung/elektroheizung/stromverbrauch.html> (Webseite letztes mal am 27.052016 besucht)

[11] <http://www.energie-experten.org/heizung/elektroheizung/nachtspeicherheizung.html> (Webseite letztes mal am 27.052016 besucht)

[12] <http://www.heizungsfinder.de/elektroheizung/speicherheizung/nachtspeicherheizung> (Webseite letztes mal am 27.052016 besucht)

[13] <http://www.heizungsfinder.de/elektroheizung/speicherheizung/vorteile-nachteile> (Webseite letztes mal am 27.052016 besucht)

[14] <https://prezi.com/0hvbpre9knzj/energiesektoren/> (Webseite letztes mal am 27.052016 besucht)

[15] <http://www.energieheld.de/heizung/waermepumpe/luft-wasser-waermepumpe/lautstaerke> (Webseite letztes mal am 27.052016 besucht)

15. Anhang

R22		Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
Temp. °C	Press. bar	Sat. Liquid v _f × 10 ³	Sat. Vapor v _g	Sat. Liquid u _f	Sat. Vapor u _g	Sat. Liquid h _f	Evap. h _{fg}	Sat. Vapor h _g	Sat. Liquid s _f	Sat. Vapor s _g	
-60	0.3749	0.6833	0.5370	-21.57	203.67	-21.55	245.35	223.81	-0.0964	1.0547	-60
-50	0.6451	0.6966	0.3239	-10.89	207.70	-10.85	239.44	228.60	-0.0474	1.0256	-50
-45	0.8290	0.7037	0.2564	-5.50	209.70	-5.44	236.39	230.95	-0.0235	1.0126	-45
-40	1.0522	0.7109	0.2052	-0.07	211.68	0.00	233.27	233.27	0.0000	1.0005	-40
-36	1.2627	0.7169	0.1730	4.29	213.25	4.38	230.71	235.09	0.0186	0.9914	-36
-32	1.5049	0.7231	0.1468	8.68	214.80	8.79	228.10	236.89	0.0369	0.9828	-32
-30	1.6389	0.7262	0.1355	10.88	215.58	11.00	226.77	237.78	0.0460	0.9787	-30
-28	1.7819	0.7294	0.1252	13.09	216.34	13.22	225.43	238.66	0.0551	0.9746	-28
-26	1.9345	0.7327	0.1159	15.31	217.11	15.45	224.08	239.53	0.0641	0.9707	-26
-22	2.2698	0.7393	0.0997	19.76	218.62	19.92	221.32	241.24	0.0819	0.9631	-22
-20	2.4534	0.7427	0.0926	21.99	219.37	22.17	219.91	242.09	0.0908	0.9595	-20
-18	2.6482	0.7462	0.0861	24.23	220.11	24.43	218.49	242.92	0.0996	0.9559	-18
-16	2.8547	0.7497	0.0802	26.48	220.85	26.69	217.05	243.74	0.1084	0.9525	-16
-14	3.0733	0.7533	0.0748	28.73	221.58	28.97	215.59	244.56	0.1171	0.9490	-14
-12	3.3044	0.7569	0.0698	31.00	222.30	31.25	214.11	245.36	0.1258	0.9457	-12
-10	3.5485	0.7606	0.0652	33.27	223.02	33.54	212.62	246.15	0.1345	0.9424	-10
-8	3.8062	0.7644	0.0610	35.54	223.73	35.83	211.10	246.93	0.1431	0.9392	-8
-6	4.0777	0.7683	0.0571	37.83	224.43	38.14	209.56	247.70	0.1517	0.9361	-6
-4	4.3638	0.7722	0.0535	40.12	225.13	40.46	208.00	248.45	0.1602	0.9330	-4
-2	4.6647	0.7762	0.0501	42.42	225.82	42.78	206.41	249.20	0.1688	0.9300	-2
0	4.9811	0.7803	0.0470	44.73	226.50	45.12	204.81	249.92	0.1773	0.9271	0
2	5.3133	0.7844	0.0442	47.04	227.17	47.46	203.18	250.64	0.1857	0.9241	2
4	5.6619	0.7887	0.0415	49.37	227.83	49.82	201.52	251.34	0.1941	0.9213	4
6	6.0275	0.7930	0.0391	51.71	228.48	52.18	199.84	252.03	0.2025	0.9184	6
8	6.4105	0.7974	0.0368	54.05	229.13	54.56	198.14	252.70	0.2109	0.9157	8
10	6.8113	0.8020	0.0346	56.40	229.76	56.95	196.40	253.35	0.2193	0.9129	10
12	7.2307	0.8066	0.0326	58.77	230.38	59.35	194.64	253.99	0.2276	0.9102	12
16	8.1268	0.8162	0.0291	63.53	231.59	64.19	191.02	255.21	0.2442	0.9048	16
20	9.1030	0.8263	0.0259	68.33	232.76	69.09	187.28	256.37	0.2607	0.8996	20
24	10.164	0.8369	0.0232	73.19	233.87	74.04	183.40	257.44	0.2772	0.8944	24
28	11.313	0.8480	0.0208	78.09	234.92	79.05	179.37	258.43	0.2936	0.8893	28
32	12.556	0.8599	0.0186	83.06	235.91	84.14	175.18	259.32	0.3101	0.8842	32
36	13.897	0.8724	0.0168	88.08	236.83	89.29	170.82	260.11	0.3265	0.8790	36
40	15.341	0.8858	0.0151	93.18	237.66	94.53	166.25	260.79	0.3429	0.8738	40
45	17.298	0.9039	0.0132	99.65	238.59	101.21	160.24	261.46	0.3635	0.8672	45
50	19.433	0.9238	0.0116	106.26	239.34	108.06	153.84	261.90	0.3842	0.8603	50
60	24.281	0.9705	0.0089	120.00	240.24	122.35	139.61	261.96	0.4264	0.8455	60

Tab. 12. gesättigte Werte des Kältemittels R22

Properties of Superheated Refrigerant 22 Vapor									
T	v	u	h	s	v	u	h	s	
$^{\circ}\text{C}$	m^3/kg	kJ/kg	kJ/kg	$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$	m^3/kg	kJ/kg	kJ/kg	$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$	
$p = 0.4 \text{ bar} = 0.04 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = -58.86^{\circ}\text{C}$)					$p = 0.6 \text{ bar} = 0.06 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = -51.40^{\circ}\text{C}$)				
Sat.	0.50559	204.13	224.36	1.0512	0.34656	207.14	227.93	1.0294	
-55	0.51532	205.92	226.53	1.0612					
-50	0.52787	208.26	229.38	1.0741	0.34895	207.80	228.74	1.0330	
-45	0.54037	210.63	232.24	1.0868	0.35747	210.20	231.65	1.0459	
-40	0.55284	213.02	235.13	1.0993	0.36594	212.62	234.58	1.0586	
-35	0.56526	215.43	238.05	1.1117	0.37437	215.06	237.52	1.0711	
-30	0.57766	217.88	240.99	1.1239	0.38277	217.53	240.49	1.0835	
-25	0.59002	220.35	243.95	1.1360	0.39114	220.02	243.49	1.0956	
-20	0.60236	222.85	246.95	1.1479	0.39948	222.54	246.51	1.1077	
-15	0.61468	225.38	249.97	1.1597	0.40779	225.08	249.55	1.1196	
-10	0.62697	227.93	253.01	1.1714	0.41608	227.65	252.62	1.1314	
-5	0.63925	230.52	256.09	1.1830	0.42436	230.25	255.71	1.1430	
0	0.65151	233.13	259.19	1.1944	0.43261	232.88	258.83	1.1545	
$p = 0.8 \text{ bar} = 0.08 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = -45.73^{\circ}\text{C}$)					$p = 1.0 \text{ bar} = 0.10 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = -41.09^{\circ}\text{C}$)				
Sat.	0.26503	209.41	230.61	1.0144	0.21518	211.25	232.77	1.0031	
-45	0.26597	209.76	231.04	1.0163					
-40	0.27245	212.21	234.01	1.0292	0.21633	211.79	233.42	1.0059	
-35	0.27890	214.68	236.99	1.0418	0.22158	214.29	236.44	1.0187	
-30	0.28530	217.17	239.99	1.0543	0.22679	216.80	239.48	1.0313	
-25	0.29167	219.68	243.02	1.0666	0.23197	219.34	242.54	1.0438	
-20	0.29801	222.22	246.06	1.0788	0.23712	221.90	245.61	1.0560	
-15	0.30433	224.78	249.13	1.0908	0.24224	224.48	248.70	1.0681	
-10	0.31062	227.37	252.22	1.1026	0.24734	227.08	251.82	1.0801	
-5	0.31690	229.98	255.34	1.1143	0.25241	229.71	254.95	1.0919	
0	0.32315	232.62	258.47	1.1259	0.25747	232.36	258.11	1.1035	
5	0.32939	235.29	261.64	1.1374	0.26251	235.04	261.29	1.1151	
10	0.33561	237.98	264.83	1.1488	0.26753	237.74	264.50	1.1265	
$p = 1.5 \text{ bar} = 0.15 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = -32.08^{\circ}\text{C}$)					$p = 2.0 \text{ bar} = 0.20 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = -25.18^{\circ}\text{C}$)				
Sat.	0.14721	214.77	236.86	0.9830	0.11232	217.42	239.88	0.9691	
-30	0.14872	215.85	238.16	0.9883					
-25	0.15232	218.45	241.30	1.0011	0.11242	217.51	240.00	0.9696	
-20	0.15588	221.07	244.45	1.0137	0.11520	220.19	243.23	0.9825	
-15	0.15941	223.70	247.61	1.0260	0.11795	222.88	246.47	0.9952	
-10	0.16292	226.35	250.78	1.0382	0.12067	225.58	249.72	1.0076	
-5	0.16640	229.02	253.98	1.0502	0.12336	228.30	252.97	1.0199	
0	0.16987	231.70	257.18	1.0621	0.12603	231.03	256.23	1.0310	
5	0.17331	234.42	260.41	1.0738	0.12868	233.78	259.51	1.0438	
10	0.17674	237.15	263.66	1.0854	0.13132	236.54	262.81	1.0555	
15	0.18015	239.91	266.93	1.0968	0.13393	239.33	266.12	1.0671	
20	0.18355	242.69	270.22	1.1081	0.13653	242.14	269.44	1.0786	
25	0.18693	245.49	273.53	1.1193	0.13912	244.97	272.79	1.0899	

Tabelle. 13. Beschaffenheiten des überhitzten Dampfs 1

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 2.5 \text{ bar} = 0.25 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = -19.51^\circ\text{C}$)				$p = 3.0 \text{ bar} = 0.30 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = -14.66^\circ\text{C}$)				
Sat.	0.09097	219.55	242.29	0.9586	0.07651	221.34	244.29	0.9502
-15	0.09303	222.03	245.29	0.9703				
-10	0.09528	224.79	248.61	0.9831	0.07833	223.96	247.46	0.9623
-5	0.09751	227.55	251.93	0.9956	0.08025	226.78	250.86	0.9751
0	0.09971	230.33	255.26	1.0078	0.08214	229.61	254.25	0.9876
5	0.10189	233.12	258.59	1.0199	0.08400	232.44	257.64	0.9999
10	0.10405	235.92	261.93	1.0318	0.08585	235.28	261.04	1.0120
15	0.10619	238.74	265.29	1.0436	0.08767	238.14	264.44	1.0239
20	0.10831	241.58	268.66	1.0552	0.08949	241.01	267.85	1.0357
25	0.11043	244.44	272.04	1.0666	0.09128	243.89	271.28	1.0472
30	0.11253	247.31	275.44	1.0779	0.09307	246.80	274.72	1.0587
35	0.11461	250.21	278.86	1.0891	0.09484	249.72	278.17	1.0700
40	0.11669	253.13	282.30	1.1002	0.09660	252.66	281.64	1.0811
$p = 3.5 \text{ bar} = 0.35 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = -10.39^\circ\text{C}$)				$p = 4.0 \text{ bar} = 0.40 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = -6.56^\circ\text{C}$)				
Sat.	0.06605	222.88	246.00	0.9431	0.05812	224.24	247.48	0.9370
-10	0.06619	223.10	246.27	0.9441				
-5	0.06789	225.99	249.75	0.9572	0.05860	225.16	248.60	0.9411
0	0.06956	228.86	253.21	0.9700	0.06011	228.09	252.14	0.9542
5	0.07121	231.74	256.67	0.9825	0.06160	231.02	225.66	0.9670
10	0.07284	234.63	260.12	0.9948	0.06306	233.95	259.18	0.9795
15	0.07444	237.52	263.57	1.0069	0.06450	236.89	262.69	0.9918
20	0.07603	240.42	267.03	1.0188	0.06592	239.83	266.19	1.0039
25	0.07760	243.34	270.50	1.0305	0.06733	242.77	269.71	1.0158
30	0.07916	246.27	273.97	1.0421	0.06872	245.73	273.22	1.0274
35	0.08070	249.22	227.46	1.0535	0.07010	248.71	276.75	1.0390
40	0.08224	252.18	280.97	1.0648	0.07146	251.70	280.28	1.0504
45	0.08376	255.17	284.48	1.0759	0.07282	254.70	283.83	1.0616
$p = 4.5 \text{ bar} = 0.45 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = -3.08^\circ\text{C}$)				$p = 5.0 \text{ bar} = 0.50 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 0.12^\circ\text{C}$)				
Sat.	0.05189	225.45	248.80	0.9316	0.04686	226.54	249.97	0.9269
0	0.05275	227.29	251.03	0.9399				
5	0.05411	230.28	254.63	0.9529	0.04810	229.52	253.57	0.9399
10	0.05545	233.26	258.21	0.9657	0.04934	232.55	257.22	0.9530
15	0.05676	236.24	261.78	0.9782	0.05056	235.57	260.85	0.9657
20	0.05805	239.22	265.34	0.9904	0.05175	238.59	264.47	0.9781
25	0.05933	242.20	268.90	1.0025	0.05293	241.61	268.07	0.9903
30	0.06059	245.19	272.46	1.0143	0.05409	244.63	271.68	1.0023
35	0.06184	248.19	276.02	1.0259	0.05523	247.66	275.28	1.0141
40	0.06308	251.20	279.59	1.0374	0.05636	250.70	278.89	1.0257
45	0.06430	254.23	283.17	1.0488	0.05748	253.76	282.50	1.0371
50	0.06552	257.28	286.76	1.0600	0.05859	256.82	286.12	1.0484
55	0.06672	260.34	290.36	1.0710	0.05969	259.90	289.75	1.0595

Tabelle. 14. Beschaffenheiten des überhitzten Dampfes 2

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 5.5 \text{ bar} = 0.55 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 3.08^\circ\text{C}$)				$p = 6.0 \text{ bar} = 0.60 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 5.85^\circ\text{C}$)				
Sat.	0.04271	227.53	251.02	0.9226	0.03923	228.44	251.98	0.9186
5	0.04317	228.72	252.46	0.9278				
10	0.04433	231.81	256.20	0.9411	0.04015	231.05	255.14	0.9299
15	0.04547	234.89	259.90	0.9540	0.04122	234.18	258.91	0.9431
20	0.04658	237.95	263.57	0.9667	0.04227	237.29	262.65	0.9560
25	0.04768	241.01	267.23	0.9790	0.04330	240.39	266.37	0.9685
30	0.04875	244.07	270.88	0.9912	0.04431	243.49	270.07	0.9808
35	0.04982	247.13	274.53	1.0031	0.04530	246.58	273.76	0.9929
40	0.05086	250.20	278.17	1.0148	0.04628	249.68	277.45	1.0048
45	0.05190	253.27	281.82	1.0264	0.04724	252.78	281.13	1.0164
50	0.05293	256.36	285.47	1.0378	0.04820	255.90	284.82	1.0279
55	0.05394	259.46	289.13	1.0490	0.04914	259.02	288.51	1.0393
60	0.05495	262.58	292.80	1.0601	0.05008	262.15	292.20	1.0504
$p = 7.0 \text{ bar} = 0.70 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 10.91^\circ\text{C}$)				$p = 8.0 \text{ bar} = 0.80 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 15.45^\circ\text{C}$)				
Sat.	0.03371	230.04	253.64	0.9117	0.02953	231.43	255.05	0.9056
15	0.03451	232.70	256.86	0.9229				
20	0.03547	235.92	260.75	0.9363	0.03033	234.47	258.74	0.9182
25	0.03639	239.12	264.59	0.9493	0.03118	237.76	262.70	0.9315
30	0.03730	242.29	268.40	0.9619	0.03202	241.04	266.66	0.9448
35	0.03819	245.46	272.19	0.9743	0.03283	244.28	270.54	0.9574
40	0.03906	248.62	275.96	0.9865	0.03363	247.52	274.42	0.9700
45	0.03992	251.78	279.72	0.9984	0.03440	250.74	278.26	0.9821
50	0.04076	254.94	283.48	1.0101	0.03517	253.96	282.10	0.9941
55	0.04160	258.11	287.23	1.0216	0.03592	257.18	285.92	1.0058
60	0.04242	261.29	290.99	1.0330	0.03667	260.40	289.74	1.0174
65	0.04324	264.48	294.75	1.0442	0.03741	263.64	293.56	1.0287
70	0.04405	267.68	298.51	1.0552	0.03814	266.87	297.38	1.0400
$p = 9.0 \text{ bar} = 0.90 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 19.59^\circ\text{C}$)				$p = 10.0 \text{ bar} = 1.00 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 23.40^\circ\text{C}$)				
Sat.	0.02623	232.64	256.25	0.9001	0.02358	233.71	257.28	0.8952
20	0.02630	232.92	256.59	0.9013				
30	0.02789	239.73	264.83	0.9289	0.02457	238.34	262.91	0.9139
40	0.02939	246.37	272.82	0.9549	0.02598	245.18	271.17	0.9407
50	0.03082	252.95	280.68	0.9795	0.02732	251.90	279.22	0.9660
60	0.03219	259.49	288.46	1.0033	0.02860	258.56	287.15	0.9902
70	0.03353	266.04	296.21	1.0262	0.02984	265.19	295.03	1.0135
80	0.03483	272.62	303.96	1.0484	0.03104	271.84	302.88	1.0361
90	0.03611	279.23	311.73	1.0701	0.03221	278.52	310.74	1.0580
100	0.03736	285.90	319.53	1.0913	0.03337	285.24	318.61	1.0794
110	0.03860	292.63	327.37	1.1120	0.03450	292.02	326.52	1.1003
120	0.03982	299.42	335.26	1.1323	0.03562	298.85	334.46	1.1207
130	0.04103	306.28	343.21	1.1523	0.03672	305.74	342.46	1.1408
140	0.04223	313.21	351.22	1.1719	0.03781	312.70	350.51	1.1605
150	0.04342	320.21	359.29	1.1912	0.03889	319.74	358.63	1.1790

Tabelle. 15. Beschaffenheiten des überhitzten Dampfs 3

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 12.0 \text{ bar} = 1.20 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 30.25^\circ\text{C}$)				$p = 14.0 \text{ bar} = 1.40 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 36.29^\circ\text{C}$)				
Sat.	0.01955	235.48	258.94	0.8864	0.01662	236.89	260.16	0.8786
40	0.02083	242.63	267.62	0.9146	0.01708	239.78	263.70	0.8900
50	0.02204	249.69	276.14	0.9413	0.01823	247.29	272.81	0.9186
60	0.02319	256.60	284.43	0.9666	0.01929	254.52	281.53	0.9452
70	0.02428	263.44	292.58	0.9907	0.02029	261.60	290.01	0.9703
80	0.02534	270.25	300.66	1.0139	0.02125	268.60	298.34	0.9942
90	0.02636	277.07	308.70	1.0363	0.02217	275.56	306.60	1.0172
100	0.02736	283.90	316.73	1.0582	0.02306	282.52	314.80	1.0395
110	0.02834	290.77	324.78	1.0794	0.02393	289.49	323.00	1.0612
120	0.02930	297.69	332.85	1.1002	0.02478	296.50	331.19	1.0823
130	0.03024	304.65	340.95	1.1205	0.02562	303.55	339.41	1.1029
140	0.03118	311.68	349.09	1.1405	0.02644	310.64	347.65	1.1231
150	0.03210	318.77	357.29	1.1601	0.02725	317.79	355.94	1.1429
160	0.03301	325.92	365.54	1.1793	0.02805	324.99	364.26	1.1624
170	0.03392	333.14	373.84	1.1983	0.02884	332.26	372.64	1.1815
$p = 16.0 \text{ bar} = 1.60 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 41.73^\circ\text{C}$)				$p = 18.0 \text{ bar} = 1.80 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 46.69^\circ\text{C}$)				
Sat.	0.01440	238.00	261.04	0.8715	0.01265	238.86	261.64	0.8649
50	0.01533	244.66	269.18	0.8971	0.01301	241.72	265.14	0.8758
60	0.01634	252.29	278.43	0.9252	0.01401	249.86	275.09	0.9061
70	0.01728	259.65	287.30	0.9515	0.01492	257.57	284.43	0.9337
80	0.01817	266.86	295.93	0.9762	0.01576	265.04	293.40	0.9595
90	0.01901	274.00	304.42	0.9999	0.01655	272.37	302.16	0.9839
100	0.01983	281.09	312.82	1.0228	0.01731	279.62	310.77	1.0073
110	0.02062	288.18	321.17	1.0448	0.01804	286.83	319.30	1.0299
120	0.02139	295.28	329.51	1.0663	0.01874	294.04	327.78	1.0517
130	0.02214	302.41	337.84	1.0872	0.01943	301.26	336.24	1.0730
140	0.02288	309.58	346.19	1.1077	0.02011	308.50	344.70	1.0937
150	0.02361	316.79	354.56	1.1277	0.02077	315.78	353.17	1.1139
160	0.02432	324.05	362.97	1.1473	0.02142	323.10	361.66	1.1338
170	0.02503	331.37	371.42	1.1666	0.02207	330.47	370.19	1.1532
$p = 20.0 \text{ bar} = 2.00 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 51.26^\circ\text{C}$)				$p = 24.0 \text{ bar} = 2.4 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 59.46^\circ\text{C}$)				
Sat.	0.01124	239.51	261.98	0.8586	0.00907	240.22	261.99	0.8463
60	0.01212	247.20	271.43	0.8873	0.00913	240.78	262.68	0.8484
70	0.01300	255.35	281.36	0.9167	0.01006	250.30	274.43	0.8831
80	0.01381	263.12	290.74	0.9436	0.01085	258.89	284.93	0.9133
90	0.01457	270.67	299.80	0.9689	0.01156	267.01	294.75	0.9407
100	0.01528	278.09	308.65	0.9929	0.01222	274.85	304.18	0.9663
110	0.01596	285.44	317.37	1.0160	0.01284	282.53	313.35	0.9906
120	0.01663	292.76	326.01	1.0383	0.01343	290.11	322.35	1.0137
130	0.01727	300.08	334.61	1.0598	0.01400	297.64	331.25	1.0361
140	0.01789	307.40	343.19	1.0808	0.01456	305.14	340.08	1.0577
150	0.01850	314.75	351.76	1.1013	0.01509	312.64	348.87	1.0787
160	0.01910	322.14	360.34	1.1214	0.01562	320.16	357.64	1.0992
170	0.01969	329.56	368.95	1.1410	0.01613	327.70	366.41	1.1192
180	0.02027	337.03	377.58	1.1603	0.01663	335.27	375.20	1.1388

Tabelle. 16. Beschaffenheiten des überhitzten Dampfs 4