

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Umweltproblematik

Im Laufe der Zeit hat der Mensch sich daran gewöhnt immer bessere Technologien zu nutzen und in Wohlstand zu leben. Diese Annehmlichkeiten bewirken selbstverständlich einen Energieverbrauch. Im Regelfall wurden früher fossile Ressourcen – Kohle, Erdgas, Erdöl – genutzt, um Energie zu erzeugen. Heutzutage wird beabsichtigt, solche Energiequellen zu vermeiden. Einerseits wegen der Erschöpfung solcher Ressourcen und andererseits wegen der Emissionen, die die Verwendung dieser Energieressourcen verursachen.

Die Abgase, die durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe – CO_2 , H_2O , CH_4 – auftreten, verursachen den sogenannten Treibhauseffekt, wodurch die vom Boden abgegebene Wärme in der Atmosphäre einbehalten wird. Das Resultat dieser Wärmeakkumulation wird Erderwärmung genannt. Als globale Erwärmung bezeichnet man den während der vergangenen Jahrzehnte beobachteten allmählichen Anstieg der Durchschnittstemperatur der erdnahen Atmosphäre und der Meere sowie die erwartete weitere Erwärmung in der Zukunft.

Die Schäden, die CO_2 -Emissionen sowie Wasserdampf und andere Gase verursachen, gaben Anlass zur Abfassung des Kyoto-Protokolls. Das Kyoto-Protokoll ist ein am 11. Dezember 1997 beschlossenes Zusatzprotokoll zur Ausgestaltung der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) der Vereinten Nationen mit dem Ziel des Klimaschutzes. Das Abkommen schreibt erstmals verbindliche Zielwerte für den Ausstoß von Treibhausgasen fest, welche die hauptsächliche Ursache der globalen Erwärmung sind. Die im Protokoll reglementierten Gase sind: Kohlendioxid (CO_2 , dient als Referenzwert), Methan (CH_4), Distickstoffoxid (Lachgas, N_2O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFCs), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFCs) und Schwefelhexafluorid (SF_6). Das Protokoll sieht vor, den jährlichen Treibhausgas-Ausstoß der Industrieländer bis zum Zeitraum 2008-2012 um durchschnittlich einen festgelegtes Prozentsatz gegenüber 1990 zu reduzieren. Die Europäische Union hat sich verpflichtet, seine Emissionen um 8% zu reduzieren. Das bedeutet nicht, dass die Emissionen

jedes Landes um 8% reduziert werden müssen. Jedes Land hat seine eigenen Regelungen [Kyo 1998].

Im Rahmen dieser Arbeit ist die Wärmepumpe mit CO_2 als Kältemittel eine sehr interessante Anwendung, um CO_2 -Emissionen zu vermindern. Im Kapitel 5.3 werden die verschiedenen Werte bezüglich CO_2 -Emissionen für die drei betrachtete Städte im Fall CO_2 -Wärmepumpe, Gas-Brennwert- bzw. Öl-Niedertemperaturanlage dargestellt.

2.2 Das Prinzip der Wärmepumpe

Die Wärmepumpe ist eine Maschine, die Wärme von einem niedrigen Temperaturniveau unter Aufwand von Arbeit auf ein höheres Temperaturniveau anhebt.

Das Kältemittel hat im Verdampfer eine niedrigere Temperatur als die Umgebung. Das Kältemittel hat einen niedrigen Siedepunkt, so dass es bei Zufuhr von Wärme verdampft und so Wärme von der Wärmequelle zur Wärmepumpe übertragen werden kann. Zur Wärmeabgabe an das Wärmeversorgungssystem weist das Kältemittel im Gaskühler eine höhere Temperatur auf. Man macht sich zwei Temperaturgefälle zu Nutze. Dazu wird der Wärmepumpe technische Arbeit in Form von beispielsweise elektrischem Strom zugeführt.

In dem hier betrachteten Fall nimmt man die Wärme der Luft oder des Grundwassers (die Wärmequelle) und gewinnt so Heiz- und Warmwasser für das Haus.

Abbildung 2.1 zeigt die vier Grundkomponenten des Kreislaufes. Jede der vier Komponenten wird im Folgenden erklärt:

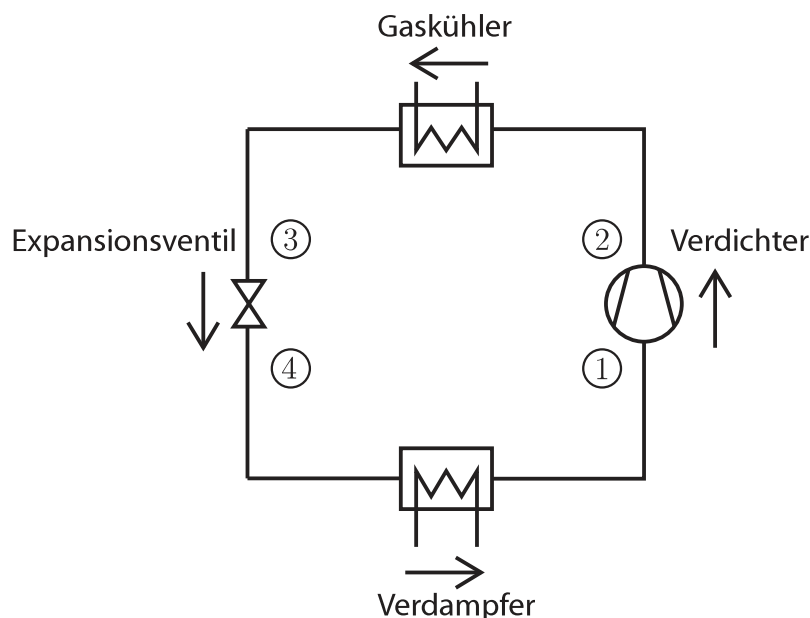


Abbildung 2.1: Grundkomponenten einer Kompression-Wärmepumpe

1-2: Verdichter: In diesem Abschnitt findet idealerweise eine adiabat isentrope Kompression statt. Das vollständig verdampfte Kältemittel erfährt eine Zustandsänderung von einem Zustand (niedriger Druck und niedrige Temperatur) in einen anderen (hoher Druck und hohe Temperatur). Eine Verdichterleistung ist nötig, diese kann wie folgt berechnet werden:

$$\dot{W}_{VD} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \quad (2.1)$$

2-3: Gaskühler: Hier liegt eine isobare Wärmeabfuhr vor. Das Kältemittel gibt Wärme an das Speicherwasser der Heizungsanlage ab. Da der Kreislauf transkritisch ist, wird die Wärme nicht bei einer konstanten Temperatur abgegeben, sondern bei gleitender, fallender Temperatur. Die so gewonnene Wärme wird wie folgt berechnet:

$$\dot{Q}_{GK} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2) \quad (2.2)$$

3-4: Expansionsventil: Isenthalpe Entspannung: Das Kältemittel erfährt eine Entspannung, wodurch der Druck stark abfällt. Dabei sinkt auch deutlich die Temperatur.

4-1: Verdampfer: Isobare Wärmezufuhr: Hier findet ein Wärmeaustausch statt. Einerseits gibt es das Kältemittel als Dampf-Flüssigkeits-Gemisch, andererseits die Wärmequelle, deren Temperatur höher als der Siedepunkt des Kältemittels ist, was die Verdampfung dieser Wärmequelle verursacht. Auf diese Weise wird der Kreislauf geschlossen. Wie die Abbildung 2.2 zeigt, findet die entsprechende Wärmeübertragung im Nassdampfgebiet statt. Für die im Verdampfer aufgenommene Wärmeleistung gilt:

$$\dot{Q}_{Vdf} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) \quad (2.3)$$

In Abbildung 2.2 ist der Kreislauf in einem p-h-Diagramm dargestellt. Jede Strecke steht in Verbindung mit einer Grundkomponente:

1-2: Im Idealfall ist die Verdichtung isentrop und adiabat.

2-3: Isobarer Wärmeaustausch mit Temperaturabfall.

3-4: Isenthalpe Expansion zu niedrigem Druck und niedriger Temperatur.

4-1: Verdampfung bei konstanter Temperatur und konstantem Druck.

Die Wärmemenge, die bereitgestellt werden kann, ist abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Gebäude, in dem die Wärme benötigt wird. Je kälter die Umgebung oder das Wasser (Wärmequelle), desto weniger Wärme kann gewonnen werden.

Der Leistungsvergleich der Anlagen wird durch den COP (Coefficient of Performance) ausgedrückt. Dieser Terminus bezeichnet die gewonnene Wärme in Abhängigkeit von der Leistung des Verdichters. Die aufgenommene Wärmeleistung im Verdampfer erscheint hier nicht, da sie kostenlos zur Verfügung steht. Der COP-Wert einer Wärmepumpe kann daher grosser als 1 sein [Coronel Toro 2003].

Die elektrisch aufgenommene Leistung eines realen Verdichters ist größer als die oben beschriebene Leistung. Es ist zu beachten, dass dieser Prozess nicht isentrop ist

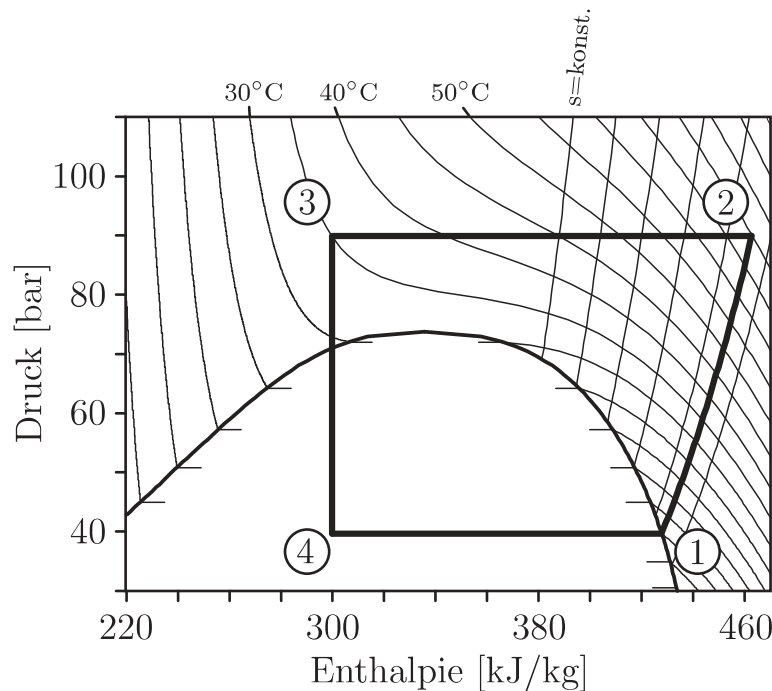


Abbildung 2.2: Idealer, transkritischer Kompressions-Kältekreislauf im p-h-Diagramm

und es einen Wärmeverlust gibt. Die Relation zwischen der realen und der adiabaten, isentropen Verdichtung wird durch den effektiv-isentropen Gütegrad $\eta_{eff-isen}$ wiedergegeben und stellt eine vom Druckverhältnis π ($\pi = \text{Hochdruck}/\text{Niedrigdruck}$) abhängige Verdichterkenngroße dar.

Mit dem Kältemittel CO₂ findet ein transkritischer Kreislauf statt. Dies bedeutet, dass der Druck unabhängig von der Temperatur des Gaskühler ist. Auf diese Weise kann man den Druck feststellen und damit den COP der Anlage optimieren.

2.3 CO₂ als Kältemittel

2.3.1 Geschichtlicher Hintergrund

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde als Kältemittel weitenteils Kohlendioxid benutzt. Wegen des Hochdrucks, der zur damaligen Zeit nicht beherrschbar war, erschien R12 als bevorzugtes Kältemittel, was aufgrund seines niedrigen Druckes und seiner Niedertemperatur eine einfache und günstige Konstruktion ermöglichte. Allerdings wurde es wegen seiner ernsthaften Auswirkungen auf die globale Umwelt, Ozonschädlichkeit und hohen Treibhauspotentials verboten. Seitdem wurde begonnen, eine neue Generation syntetischer Chemikalien (FKW) als Kältemittel zu benutzen. Sie hatten weniger Aktivität an der Umgebung, aber trugen stark zum Treibhauseffekt bei. Beispielsweise erschien das R134a, das keine Ozonschäden verursachte. Dennoch trug es ebenfalls zur Erwärmung der Erde bei. Dies sind die Gründe, warum auf europäischer Ebene eine Abkehr von FKW beschlossen wurde und Substanzen, die

sich heute natürlich in der Biosphäre befinden und deren Effekte schon lange bekannt sind, generell bevorzugt werden müssen. Dies führt zu einer Wiederentdeckung des CO₂ und einer genauen Untersuchung seiner Stoffeigenschaften [López Parrado 2004], [Pettersen/Lorentzen 1993].

2.3.2 Eigenschaften von Kohlendioxid

Vorteile

- Keine Ozonschäden (ODP=0. ODP=Ozonzerstörungspotenzial)
- Kein Treibhauspotential (GWP=0. GWP=Global Warming Potential)
- Recycling oder Rückgewinnung nicht nötig aber möglich
- Gewinnung durch normale Prozesse wie Müllverbrennung
- Weder brennbar noch giftig
- In allen Teilen der Welt in ausreichenden Mengen vorhanden
- Kleineres Anlagenvolumen
- Gute Eigenschaften der Wärmeübertragung
- Produktion und Vertrieb brauchen nicht etabliert zu werden
- Bekannte Eigenschaften
- Thermisch stabil und inertes Verhalten, was Materialprobleme und chemische Reaktionen im Kältemittelkreislauf vermeidet

Nachteile

- Erstickungsgefahr
- Transkritischer Prozess (nicht so bekannt)
- Hochdruck

Transkritische Prozessführung

Die niedrige kritische Temperatur des Kohlendioxids von ca. 31°C erfordert eine transkritische Prozessführung. Bei einer überkritischen Prozessführung durchläuft die Wärmeabgabe keinen Phasenwechsel. Aus diesem Grund ist der Druck von der Temperatur unabhängig. Der Hochdruck ist daher ein weiterer Freiheitsgrad, der dahingehend verändert werden kann, um die Effizienz der Anlage zu maximieren.

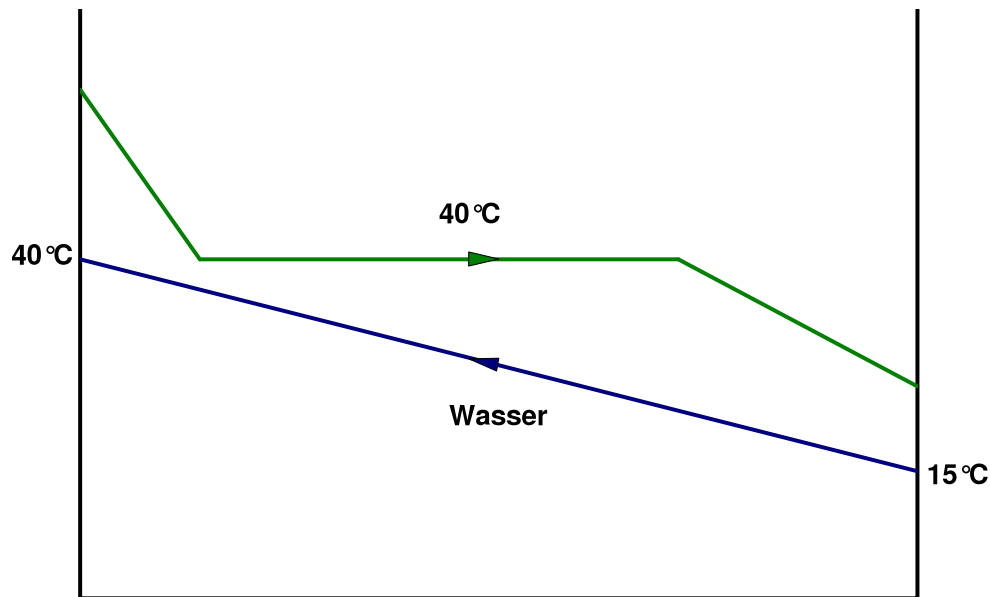


Abbildung 2.3: Wärmeübertragung zwischen Wasser und konventionellen Kältemitteln

Das Hauptinteresse dieses Kreislaufes liegt in der Warmwasserversorgung. Anders als bei Wärmepumpen, die zur Bereitstellung von Heizwasser verwendet werden und einen relativ geringen Temperaturhub haben, kann insbesondere mit einer CO_2 -Wärmepumpe effizient ein vergleichsweise großer Temperaturhub erzielt werden. Am Gaskühleraustritt ist eine höhere Warmwassertemperatur die Folge. Die Abbildung 2.3 zeigt die Übertragung zwischen Wasser und einem konventionellen Kältemittel.

Das Kohlendioxid, wie in der Abbildung 2.4 ersichtlich, ermöglicht eine höhere Vorlauftemperatur. Höhere Temperaturen (55°C - 60°C) können effizient bereitgestellt werden, wodurch Probleme mit der Legionellenbildung eingedämmt und vermieden werden können.

2.4 Passiv- und Niedrigstenergiehaus-Standard

Aufgrund der Erderwärmung, des Treibhauseffekts und des Mangels fossiler Ressourcen wird heutzutage der Energieverbrauch von Neubauten in Europa gesetzlich begrenzt. In Deutschland ist es durch die EnEV reglementiert [EnEV 2004]. Abbildung 2.5 stellt exemplarisch die Entwicklung der Wärmeschutzverordnung in der Bundesrepublik Deutschland dar [Kühl 2005].

Die Begriffe *Passivhaus* [PH] und *Niedrigstenergiehaus* [NEH] bezeichnen Baustandards, die ausgezeichnete thermische Gebäudequalität beinhalten. Ein Niedrigstenergiehaus weist einen maximalen jährlichen Endenergiebedarf von 20 kWh/m^2 Wohnfläche zur Beheizung des Gebäudes und von $12,5 \text{ kWh/m}^2$ zur Warmwasserbereitung auf. Bei Gebäuden, die dem Passivhausstandard genügen, fallen diese beiden Kennwerte sogar noch geringer aus: Der maximale Bedarfswert der Raumheizung liegt hier bei $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$; die benötigte Warmwasserenergie darf die Höchstgrenze $10 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

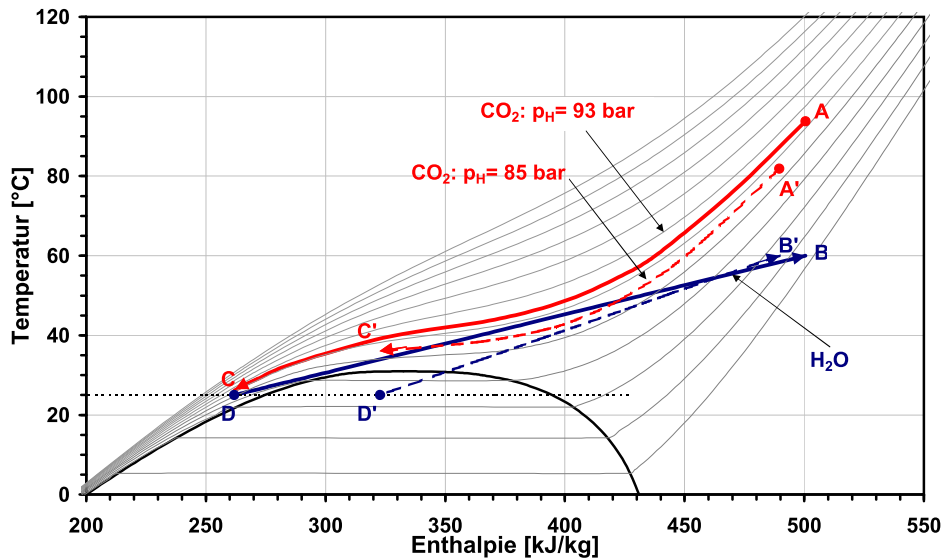


Abbildung 2.4: T-h Diagramm von Kohlendioxid. Wärmeübertragung zwischen Wasser und CO₂[Kröhnert 2006]

nicht überschreiten. Im Vergleich zu Altbauten beträgt der Energieverbrauch bei NEH weniger als 17% bzw. 10% bei PH-Standard (siehe Abbildung 2.5).

Es ist zu beobachten, dass der Heizverbrauch bei beiden Standards nur einen kleinen Anteil des gesamten Verbrauchs bedeutet. Bei Altbauten repräsentierte dieser Wert $\frac{4}{5}$ des gesamten Energieverbrauchs während es bei Niedrigstenergiehäusern nur $\frac{3}{5}$ bzw. $\frac{1}{2}$ bei Passivhäusern sind. Das bedeutet, dass die Wärmepumpe in Neubauten zwar insgesamt weniger Heizwärme, dafür aber meistens Wasser mit einer höheren Temperatur bereitstellt. Aus diesem Grund ist CO₂ ein sehr geeignetes Kältemittel für Neubauten, da die Wärmepumpe Wärmeenergie auf hohen Temperaturniveaus effizient bereitstellen kann. Im Fall eines Propan-Kreisprozesses können solche Temperaturen nur mit hohen Effizienzeinbußen erreicht werden [Kosowski et al. 2006].

Folgende Grundsätze bilden einen Leitfaden zum Bau von Passivhäusern [Feist/Sariri]:

- Guter Wärmeschutz und Kompaktheit
- Südorientierung und Verschattungsfreiheit
- Superverglasung und Superfensterrahmen
- Luftdichtheit des Gebäudes
- Passive Vorerwärmung der Frischluft
- Hochwirksame Rückgewinnung der Wärme aus der Abluft mit einem Gegenstromwärmeübertrager
- Erwärmung des Brauchwassers mit teilweise regenerativen Energien

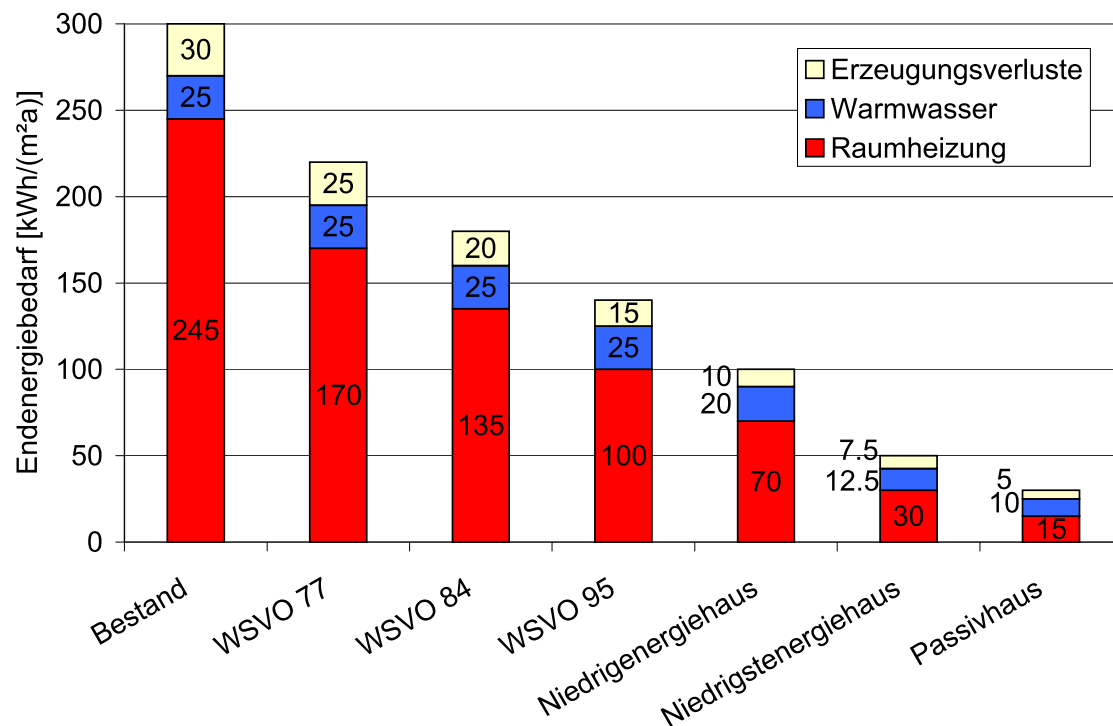


Abbildung 2.5: Entwicklung der Dämmstandards von Neubauten in Deutschland

- Energiespargeräte für den Haushalt

Obwohl die Konzepte PH- und NEH-Standard immer mit der Unterstützung einer Solaranlage rechnen, wird im Rahmen dieser Arbeit nur die Wärmebereitstellung der Wärmepumpe betrachtet.