

1.2 Angabe von technischen Daten für Wärmepumpen

Je nach Bauart einer Wärmepumpe sind genau definierte Betriebszustände festgelegt, für die technische Daten, z. B. die Leistungszahl, angegeben werden. Diese Betriebszustände werden beispielhaft wie folgt notiert:

- Sole/Wasser-Wärmepumpe: B5/W55
- Wasser/Wasser-Wärmepumpe: W7/W55
- Luft/Wasser-Wärmepumpe: A2/W35.

Die erste Buchstaben-Zahlen-Kombination wird für den Verdampfer definiert, die zweite für den Kondensator der Wärmepumpe. Der Buchstabe steht für den Wärmeträger, gefolgt von der Eintrittstemperatur des Wärmeträgers in den Verdampfer bzw. für die Austrittstemperatur am Kondensator. Die Temperaturen werden in Grad Celsius angegeben. Für die Wärmeträger wurden folgende Abkürzungen festgelegt:

- B (brine): Sole
- W (water): Wasser
- A (air): Luft.

Die maximalen Heizleistungen von Serien-Wärmepumpen führender Hersteller weichen voneinander ab, jedoch ergeben sich für die einzelnen Bauarten folgende überschlägige Maximalwerte:

- Sole/Wasser-Wärmepumpe bis zu einer Heizleistung von ca. 130 kW
- Wasser/Wasser-Wärmepumpe bis zu einer Heizleistung von ca. 180 kW
- Luft/Wasser-Wärmepumpe bis zu einer Heizleistung von ca. 60 kW

Zur eindeutigen Angabe der energetischen Güte einer Wärmepumpe sind als Kriterium die Eintrittstemperatur des Wärmequellenmediums in den Verdampfer und die Austrittstemperatur des Wärmesenkenmediums aus dem Kondensator erforderlich.

1.3 Aufbau und Funktion einer Wärmepumpe am Beispiel einer einstufigen Kompressions-Wärmepumpe

Eine einstufige Kompressions-Wärmepumpe besteht aus vier Hauptkomponenten:

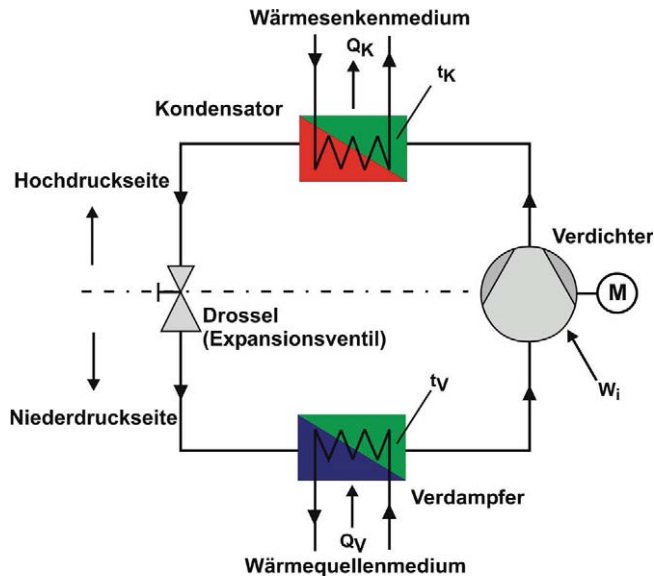
- Verdampfer,
- Verdichter mit Antriebsmotor,
- Kondensator,
- Expansionsventil (= Drosselventil),

die über Kältemittelleitungen miteinander verbunden sind. Eine einstufige Kompressions-Wärmepumpe arbeitet zwischen zwei Druckniveaus. Bei Kompressions-Wärmepumpen entspricht jedes Druckniveau einem über die Dampfdruckkurve des Kältemittels zugehörigen definierten Temperaturniveau. Somit gilt:

p_v = Verdampfungsdruck \Leftrightarrow t_v = Verdampfungstemperatur (z. B. -25 bis $+5$ °C im Haushalt)

p_k = Kondensationsdruck \Leftrightarrow t_k = Kondensationstemperatur (z. B. $+35$ bis $+80$ °C im Haushalt)

Abbildung 1.2 zeigt das vereinfachte Schaltbild einer einstufigen Kompressions-Wärmepumpe, die von einem Elektromotor angetrieben wird.



t_v : Verdampfungstemperatur Q_v : Verdampferwärme
 t_k : Kondensationstemperatur W_i : Innere Verdichterarbeit
 Q_k : Kondensatorwärme

Abb. 1.2: Schematischer Aufbau einer einstufigen Kompressions-Wärmepumpe

Auf Basis der Abbildung 1.2 wird die Funktion einer Kompressions-Wärmepumpe mit den vier Hauptkomponenten vereinfacht erklärt. Als Kältemittel wird beispielhaft Propan (R-290) verwendet.

Verdichter

Der Verdichter einer Kompressions-Wärmepumpe wird im häuslichen Bereich fast ausschließlich von einem Elektromotor angetrieben. Der Verdichter saugt Kältemitteldampf über die Saugleitung aus dem Verdampfer ab. Da sich im Verdampfer ein Gemisch von Kältemittelflüssigkeit und -dampf befindet, stellt sich die Verdampfungstemperatur entsprechend dem dort herrschenden Verdampfungsdruck ein (z. B. bei R-290: $-10\text{ °C} = 345,3\text{ kPa}$ (abs.)). Es darf davon ausgegangen werden, dass das Kältemittel etwas überhitzt vom Verdichter angesaugt wird, unter Arbeitszufuhr komprimiert wird und dass der Kältemitteldampf nach der Kompression überhitzt ist. Je nach Druckdifferenz zwischen Kondensationsdruck und Verdampfungsdruck, Kältemittel und Güte des Verdichters liegt die Überhitzungstemperatur zwischen $+60\text{ °C}$ und $+110\text{ °C}$. Am Austritt des Verdichters befindet sich das Kältemittel auf dem höchsten Temperaturniveau des gesamten Kreislaufes.

Kondensator

Der nach dem Verdichter herrschende Druck (= Kondensationsdruck p_k) ist abhängig von der Eintrittstemperatur des Wärmesenkenmediums in den Kondensator bei gegebener Wärmeüber-

tragungsfläche und gegebenem Wärmedurchgangskoeffizienten des Kondensators sowie bei gleichbleibendem Volumenstrom der Wärmesenke. Handelt es sich beim Wärmesenkenmedium um Wasser, z. B. für eine Fußbodenheizung, wird für R-290 der Druck auf ca. 1218 kPa(abs.) (= +35 °C) ansteigen. Das komprimierte Kältemittelgas gelangt über die Druckleitung in den Kondensator. Durch Wärmeabgabe im Kondensator findet die Abkühlung des Kältemittels auf die Sättigungstemperatur, die Kondensation des Kältemittels und anschließend eventuell eine geringfügige Unterkühlung (um ca. 3 K) des Kältemittels statt.

Expansionsventil

Das flüssige, eventuell etwas unterkühlte Kältemittel strömt dann vom Kondensator in der Flüssigkeitsleitung zum Expansionsventil. Im idealen Expansionsventil erfolgt die Drosselung des Kältemittels (spezifische Enthalpie = konstant) und es gelangt danach über die Einspritzleitung wieder zurück in den Verdampfer. Der thermodynamische Kreislauf ist damit geschlossen. Durch die Druckabsenkung im Expansionsventil verdampft bereits ein Teil des Kältemittels. Nach dem Drosselventil ist ein Gemisch aus Kältemittelflüssigkeit und -dampf vorhanden, sodass dort wieder die Sättigungstemperatur herrscht, die dem Druck entspricht, also z. B. für R-290 bei $-10\text{ °C} = 345,3\text{ kPa(abs.)}$.

Verdampfer

Dem Verdampfer wird durch ein Wärmequellenmedium (z. B. Luft, Glykol-Wasser-Gemisch, Wasser) von außen Wärme zugeführt, sodass Kältemittel bei konstantem Druck verdampft. Der entstehende Kältemitteldampf wird über die Saugleitung vom Verdichter angesaugt. Der Kältemittelkreislauf ist damit geschlossen.

1.3.1 Ergänzende Anmerkungen

Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik bleibt beim Betrieb der Wärmepumpe gewahrt, da für den Wärmetransport von einem niedrigen auf ein höheres Temperaturniveau Energie (über den Verdichter) aufgewandt wird. Der Kältemittelkreislauf wird auch als **Primärkreislauf** und der Wärmesenkenkreislauf als **Heizkreislauf** bezeichnet.

Voraussetzungen für einen wirtschaftlichen Betrieb einer Wärmepumpe sind:

- Verdampfungstemperatur t_v so hoch wie möglich
- Kondensationstemperatur t_k so niedrig wie möglich
- Treibende Temperaturdifferenz am Verdampfer/Kondensator niedrig, d. h.:
max. 8 K bei Wärmeübertragung zwischen Luft und einem Kältemittel
max. 3 K bei Wärmeübertragung zwischen Flüssigkeit und einem Kältemittel.

1.4 Kältemittel

1.4.1 Allgemeines

Als Kältemittel bezeichnet man einen Stoff, der in einer Wärmepumpe einen thermodynamischen Kreisprozess zu dem Zweck durchläuft, im Verdampfer Wärme aufzunehmen und im Kondensator wieder abzugeben. Prinzipiell ist jedes Fluid als Kältemittel verwendbar. Bei Kaltdampf-Kompres-

1.12 Sankey-Diagramm

1.12.1 Wärmepumpe mit Elektromotor

In der Abbildung 1.12 werden die Energieflüsse für eine elektromotorisch angetriebene Luft/Wasser-Wärmepumpe dargestellt, die elektrische Energie über fossil betriebene Kraftwerke bezieht. Die angegebenen Zahlenwerte sind exemplarisch.

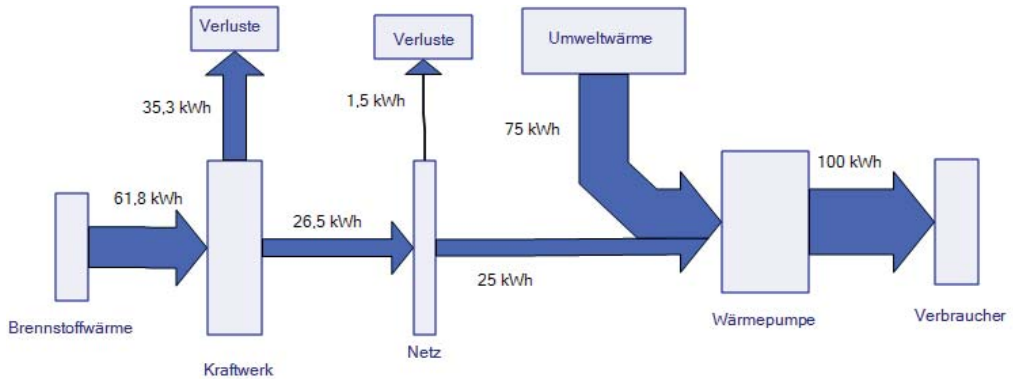


Abb. 1.12: Sankey-Diagramm für Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Elektromotor

Aus Abbildung 1.12 ist ersichtlich, dass von einer Leistungszahl der Wärmepumpe von 4,0 ausgegangen wird. Es errechnet sich der Brennstoffnutzungsgrad φ (= Heizzahl φ) von 1,62. Die Heizzahl wird in der Energietechnik definiert als das Verhältnis von bereitgestellter Nutzenergie am Verbraucher zur eingesetzten Brennstoffwärme. Die Heizzahl φ für eine gasgefeuere Kesselanlage ohne Brennwerttechnik im Gebäudebereich liegt bei rund 0,85. Je höher die Heizzahl ist, desto weniger Brennstoffwärme wird zur Bereitstellung von Nutzwärme aufgewendet.

1.12.2 Wärmepumpe mit Verbrennungsmotor

In der Abbildung 1.13 werden die Energieflüsse für eine verbrennungsmotorisch angetriebene Luft/Wasser-Wärmepumpe dargestellt. Die angegebenen Zahlenwerte sind exemplarisch.

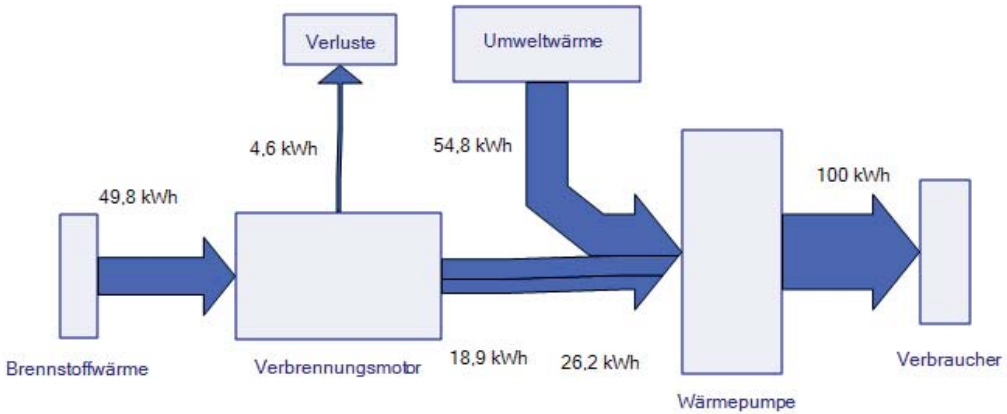


Abb. 1.13: Sankey-Diagramm für eine Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Erdgasmotor

Aus Abbildung 1.13 ist ersichtlich, dass von einer effektiven Leistungszahl der Wärmepumpe von 3,8 (effektive Arbeit von 26,2 kWh) ausgegangen wird. Es errechnet sich der Brennstoffnutzungsgrad φ (= Heizzahl φ) von 2,0.

1.13 Energetischer Wirkungsgrad

Eine Bewertung energetischer Prozesse erfolgt über Kennzahlen, beispielsweise über den energetischen Wirkungsgrad, der allgemein als Verhältnis von Nutzen zu Aufwand definiert ist und auftretende Energieverluste eines Prozesses berücksichtigt. Allgemein lässt sich der energetische Wirkungsgrad wie folgt berechnen:

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\sum_i \dot{E}_{i,A}}{\sum_j \dot{E}_{j,E}} = 1 - \frac{\sum_k \dot{E}_{k,Ver}}{\sum_j \dot{E}_{j,E}} \leq 1,0 \quad (\text{Gl. 1.23})$$

- \dot{E} : Energiestrom
- η : Energetischer Wirkungsgrad

Indices:

- i, j, k: Laufvariable
- E: Eintritt
- A: Austritt
- Ver: Verlust

Die bei einer Energieumwandlung auftretenden Verluste bewirken, dass die nach der Umwandlung zur Verfügung stehende Energie kleiner ist als die zugeführte Energie, sodass in der Praxis der maximal mögliche Wirkungsgrad $\eta = 1$ nicht erreicht werden kann. Für einen Prozess, der aus einer Reihe von Energieumwandlungen besteht (z. B. Elektromotor und Verdichter), ergibt sich der Gesamtwirkungsgrad aus dem Produkt der energetischen Einzelwirkungsgrade.

1.14 Leistungszahl

Die Leistungszahl ε [englisch: Coefficient of Performance (COP)] als Kennzahl für eine elektromotorisch angetriebene Kompressions-Wärmepumpe, die z. B. für einen definierten Betriebszustand während eines Zeitpunktes gilt, berechnet sich aus:

$$\varepsilon_{\text{el}} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\dot{Q}}{P_{\text{el}}} \quad (\text{Gl. 1.24})$$

Der Quotient von Nutzen zu Aufwand sollte bei Wärmepumpen und Kälteanlagen größer als eins werden. Je nach betrachteter Bilanzgrenze können unterschiedliche Wärmepumpen-Leistungszahlen definiert werden, z. B.:

- Theoretische Leistungszahl, bezogen auf die theoretische Verdichterleistung
- Effektive Leistungszahl, bezogen auf die effektive Leistung an der Verdichtermelle.

Die Leistungszahl lässt sich aus den Differenzen der spezifischen Enthalpie unter Zuhilfenahme von Wirkungsgraden des Wärmepumpenverdichters und des Antriebs errechnen.

In der Wärmepumpentechnik unterscheidet man ferner zwischen der Netto-Leistungszahl und der Brutto-Leistungszahl. Die Netto-Leistungszahl bezieht sich nur auf die Wärmepumpe selbst und enthält ausschließlich die elektrische Leistungsaufnahme für den Verdichtermotor. Die Brutto-Leistungszahl bezieht sich auf die gesamte Wärmepumpenanlage mit dem erforderlichen Energieaufwand aller Nebaggregate wie Pumpen oder Ventilatoren für die Wärmequellenseite und für die Wärmesenkenseite.

1.15 Arbeitszahl

Aus der Leistungszahl, die nur für einen definierten Betriebszustand der Wärmepumpenanlage und für einen Zeitpunkt gilt, wird die Arbeitszahl β , wenn sich die energietechnische Betrachtung einer elektrisch angetriebenen Kompressions-Wärmepumpe auf einen Zeitraum (z. B. Woche, Monat, Jahr) bezieht. Die Arbeitszahl ist das Verhältnis der von einer Wärmepumpenanlage in einem definierten Betrachtungszeitraum bereitgestellten Nutzwärme zu der insgesamt aufgewendeten elektrischen Arbeit.

1.16 Jahresarbeitszahl

Die Jahresarbeitszahl (JAZ) ist eine Kennzahl für elektromotorisch angetriebene Kompressions-Wärmepumpen. Sie dient dazu, um vom Jahreswärmebedarf auf den Endenergiebedarf an der Gebäudegrenze schließen zu können. Es ist zwischen der berechneten Jahresarbeitszahl (SCOP = Seasonal Coefficient of Performance) und der gemessenen Jahresarbeitszahl (SPF = Seasonal Performance Factor) zu unterscheiden. Der SCOP und der SPF können sich in der Praxis beträchtlich unterscheiden [1.39].

$$\text{JAZ} = \frac{\sum Q_{\text{WP,a}}}{\sum W_{\text{WP,a}}} = \frac{\text{Jährlich abgegebene Nutzwärme}}{\text{Jährlich eingesetzte elektrische Arbeit}} \quad (\text{Gl. 1.25})$$

8 Nachhaltigkeit

8.1 Einführung

Die zentralen Grundgedanken zur Nachhaltigkeit können einfach über ein sogenanntes Nachhaltigkeitsmodell erklärt werden. Abbildung 8.1 zeigt ein Schnittmengenmodell zu den Grundsäulen der Nachhaltigkeit, d. h. zum Umweltschutz (Ökologie), zur Sozialverantwortung (Soziales) und zur Wirtschaftlichkeit (Ökonomie).

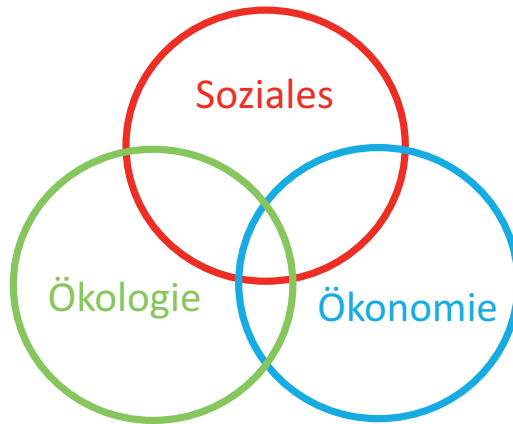


Abb. 8.1: Schnittmengenmodell zur Nachhaltigkeit

Ziel des Nachhaltigkeitsgedanken ist, die Gesellschaft auf unserer Erde derart weiterzuentwickeln, dass auf ökologische, auf ökonomische und auf soziale Aspekte weltweit Wert gelegt wird. Ferner sind alle Aspekte gleichzeitig umzusetzen. Wichtig beim Nachhaltigkeitsgedanken ist, dass alle drei genannten Aspekte theoretisch die gleiche Wertigkeit aufweisen sollen. In der praktischen Umsetzung des Modells werden immer mehr oder weniger große Abhängigkeiten zwischen den Aspekten auftreten, die in Abbildung 8.1 durch die sich ergebenden Schnittmengen deutlich gemacht werden. Das Schnittmengenmodell zur Nachhaltigkeit kann auch zur Bewertung von Projekten verwendet werden.

Der Aspekt der „Ökologie“ beschäftigt sich ganzheitlich mit dem Umweltschutz. Ziel ist, durch ein entsprechendes Handeln einen schonenden Umgang mit den natürlichen Ressourcen zu erreichen. Die Umwelt ist Lieferant für Rohstoffe jeder Art. Sie nimmt sämtliche vom Menschen erzeugte Abfälle und Emissionen auf und reagiert durch entsprechende Umweltauswirkungen.

Die „Ökonomie“ als der zweite Aspekt der Nachhaltigkeit steht allgemein mit dem menschlichen Handeln in Unternehmen in Verbindung, wobei ein funktionierendes Wirtschaftssystem aufrechterhalten werden soll. Das Ziel eines Unternehmens sollte zukünftig nicht ausschließlich in einer Gewinnmaximierung liegen, sondern es sollte durch nachhaltiges Handeln auf ein langfristiges

und wirtschaftlich abgesichertes Bestehen ausgerichtet werden. Die hierzu notwendigen Ressourcen, die ein Unternehmen, aber auch einzelne Menschen benötigen, dürfen zukünftig weltweit betrachtet nicht größer sein als diejenigen Ressourcen, welche die Natur im gleichen Zeitraum generieren kann. Hier kommt auch der Gedanke an zukünftige Generationen zum Tragen.

Der Aspekt des „Sozialen“ zielt auf das Handeln von Menschen gegenüber ihren Mitmenschen ab. In diesem sozialen Aspekt sind grundlegende Forderungen verankert, wie Gerechtigkeit, Chancengleichheit unter Berücksichtigung der demographischen Entwicklung und Solidarität für alle auf der Erde lebenden Menschen. Ergänzend können weitere Forderungen gestellt werden wie das Recht auf Bildung, auf soziale Sicherungssysteme und auf eine gleiche Lebensqualität.

Der Nachhaltigkeitgedanke kann auf viele gesellschaftliche Bereiche angewandt werden. Das Thema „Nachhaltigkeit“ verfolgt eine Vielzahl von Zielen, wobei in der vorliegenden Dokumentation ausschließlich auf diejenigen Bereiche eingegangen wird, welche Wärmepumpen betreffen. Eine Herausforderung ist auch heute noch, die „richtige“ Bewertung der Nachhaltigkeit durch entsprechende Kennzahlen (Indikatoren) und die Verwendung von Vergleichsprozessen zur Analyse anzuwenden. Die für eine Bewertung der Nachhaltigkeit anzuwendenden Aspekte (z. B. Materialverbrauch, Energieverbrauch) sind vielfältig, miteinander verbunden und teilweise auch nicht objektiv darstellbar.

8.2 Nachhaltigkeit der Energieversorgung

Allgemein sind an die Energieversorgung drei zentrale Forderungen zu stellen:

- Hohe Versorgungssicherheit
- Gute Wirtschaftlichkeit
- Hohe Umweltverträglichkeit.

Betrachtet man ausschließlich die Umweltverträglichkeit, so ist diese mit der Energieeffizienz verbunden: Hohe Energieeffizienz beim Betrieb einer Anlage bedeutet parallel auch eine Verbesserung der Ökobilanz.

Ob ein Energieversorgungssystem über die Lebensdauer wirklich nachhaltig ist, wird durch ganzheitliche Bewertungsmethoden ermittelt. Ganzheitliche Methoden bilanzieren den wirtschaftlichen, ökologischen, technischen und sozialen Einfluss von Produkten, Verfahren und Dienstleistungen (z. B. Serviceeinsätze) über den gesamten Lebenszyklus hinweg.

8.3 Nachhaltigkeit von Kompressions-Wärmepumpen

Die Ermittlung der Nachhaltigkeit von Kompressions-Wärmepumpen ist nicht einfach darstellbar. Eine allgemein gültige Betrachtung zur Nachhaltigkeit ist nicht möglich, da die Leistungsklassen von Kompressions-Wärmepumpen von wenigen Watt bis zu einigen Megawatt betragen und die Einsatzbedingungen unterschiedlich sind (häuslicher Bereich, Gewerbe, Industrie). Ein Unterschied ergibt sich zwangsläufig bei der Nachhaltigkeit zwischen Serienprodukten und Einzelanfertigungen.

Bei Kompressions-Wärmepumpen für die Serienfertigung handelt es sich um Produkte, für die bereits vor der eigentlichen Fertigung beim Hersteller ein schwer abschätzbarer Energieeinsatz

bei den Lieferanten der Einzelkomponenten (z. B. Verdichter, Wärmeübertrager, Elektronik, Kältemittel, Rohrleitungen) erfolgt. Die Einzelkomponenten werden in vielen Ländern der Erde produziert und zum Wärmepumpenhersteller transportiert, um dort aus ihnen eine Wärmepumpe zu fertigen. Eine Beurteilung bezüglich der Herstellung einer Wärmepumpe ist z. B. durch den energetischen Erntefaktor EF möglich [8.1]. Der energetische Erntefaktor für eine Wärmepumpe gibt vereinfacht an, wie oft diese Wärmepumpe die zu ihrer Herstellung benötigte Energie während der Lebensdauer wieder erwirtschaftet und als Nutzenergie (Wärme) bereitgestellt hat.

Es stellt sich die Frage, weshalb gerade Kompressions-Wärmepumpen nachhaltige Heizungssysteme sind.

- Wärmepumpen schonen die natürlichen Ressourcen der Erde, da zur Beheizung ein Anteil an Umweltwärme (z. B. Luft oder Erdwärme) verwendet wird. Wärmepumpen haben, je nach Betriebsbedingungen, eine hohe Effizienz, die durch die Leistungszahl oder das Wärmeverhältnis ausgedrückt wird.
- Wärmepumpen stellen ein langfristig einsetzbares Heizungssystem dar, welches nach der Außerbetriebnahme fachgerecht recycelbar ist.
- Wärmepumpen haben eine sehr gute Verträglichkeit bezüglich Umwelt, Klima und Gesundheit, da sie derart konzipiert sind, dass keine schädlichen Stoffe die Anlage verlassen (hermetisch dichte Anlage [8.2]). Am Betriebsort werden keine Abgasemissionen in die Umwelt entlassen. Die zunehmende Verwendung von regenerativer Antriebsenergie (z. B. aus Wind, PV) führt zu einer weiteren stetigen Verbesserung der Nachhaltigkeit.
- Die Gesamtkosten für ein Wärmepumpensystem liegen im vertretbaren Bereich, sodass dieses Heizungssystem für eine breite Bevölkerungsschicht einsetzbar ist.
- Es besteht die Möglichkeit, dass Wärmepumpen mehrere parallele Nutzungsarten aufweisen, d. h. Bereitstellung von Heizwärme, Kühlung von Gebäuden und Warmwasserbereitung. Die Verwendung unterschiedlicher Nutzungsarten steigert die Lebensqualität nachhaltig.
- Der Einsatz der Digitalisierung bei der Herstellung und beim Betrieb von Wärmepumpen steigert die Nachhaltigkeit, da ein umfassendes Monitoring und eine gute Visualisierung der Produktion sowie des Betriebs der Wärmepumpe mit einer anschließenden Analyse bereits heute zum Stand der Technik gehören.

Technisch betrachtet wird die Nachhaltigkeit einer Wärmepumpe bestimmt durch:

- Jahresarbeitszahl bei elektrisch angetriebenen Wärmepumpen
- Bereitstellung von elektrischer Antriebsenergie (Strommix)
- Eingesetztes Kältemittel und Umgang mit dem Kältemittel
- Produktionsverfahren zur Herstellung von Wärmepumpen
- Konstruktion der Wärmepumpe und Materialeinsatz
- Geringer TEWI-Wert (siehe Abschnitt 8.4).

8.4 TEWI-Wert

Bei einem umwelttechnischen Vergleich zwischen Wärmeversorgungssystemen wird derzeit vor allem die CO₂-Emission betrachtet. Zur einheitlichen Bewertung von Wärmepumpen oder Kälteanlagen ist das TEWI-Konzept (= Total Equivalent Warming Impact) geeignet [8.3]. Der zu berechnende TEWI-Wert setzt sich aus zwei Anteilen zusammen, dem indirekten Anteil und dem direkten Anteil zum Treibhauseffekt, die jeweils über den GWP-Wert berechnet werden.