

Wärmepumpensysteme

In einer Wärmepumpe wird mit Hilfe eines Arbeits- oder Kältemittels Wärme von einem niedrigeren auf ein höheres Temperaturniveau gebracht. Der dazu notwendige Antrieb kann mechanischer oder thermischer Natur sein. Als Wärmequellen und Wärmesenken kommen verschiedene Medien in Betracht. allen Wärmepumpen gemein ist, dass die (elektrisch oder als Brennstoff) zugeführte Energiemenge in der Regel geringer ist als die nutzbare Heizwärmemenge. Die Differenz ist nutzbar gemachte Umgebungswärme.

Eine Übersicht der wichtigsten möglichen Einteilungskriterien von Wärmepumpen zeigt Bild 5.2.9.3-1.

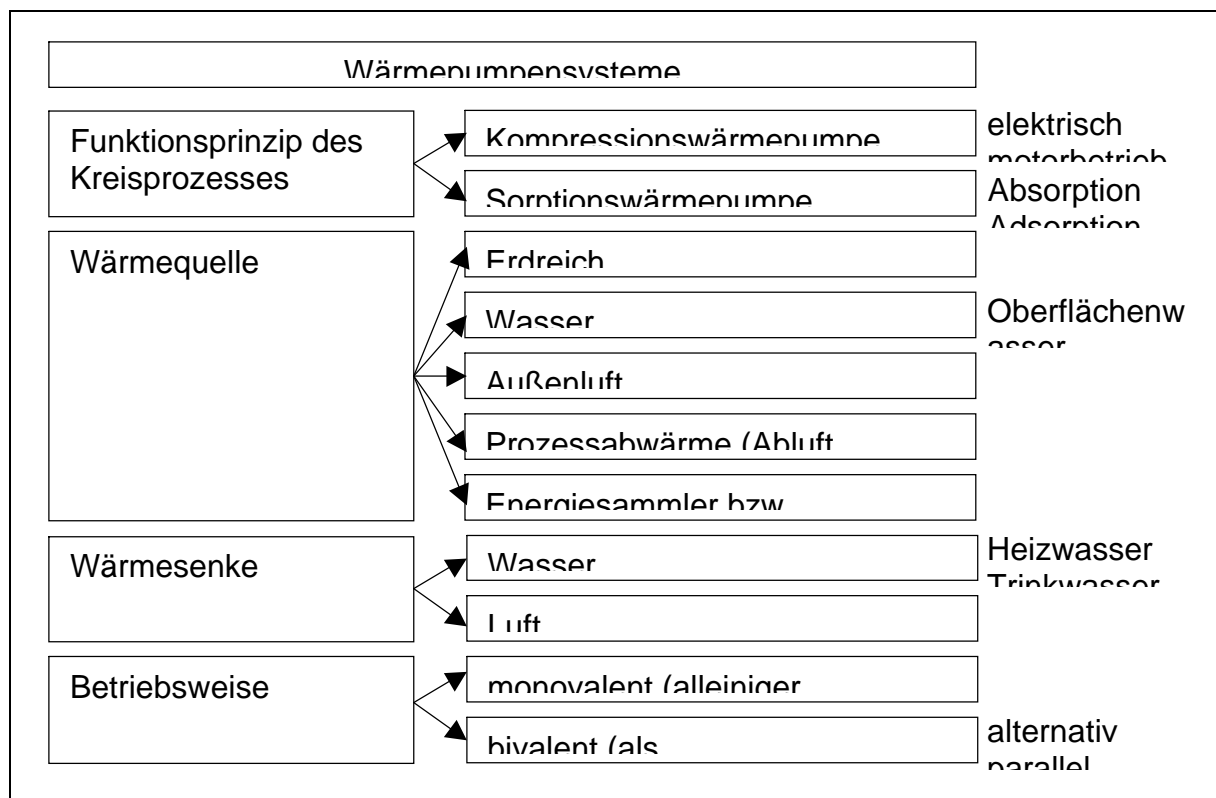


Bild 5.2.9.3-1 Einteilung der Wärmepumpen

Funktionsprinzip des Wärmepumpenprozesses

In einer Wärmepumpe wird ein Kältemittel oder Arbeitsmittel zirkulierend bewegt und durchläuft dabei verschiedene thermodynamische Zustandsänderungen. Der Prozess heißt Kreisprozess. Im Verdampfer nimmt das Kältemittel Wärme, z.B. Umgebungswärme aus der Luft auf. Im Verflüssiger gibt es diese Wärme an das zu beheizende Medium ab. Verdichter und Verdampfer werden auf unterschiedlichen Druckniveaus betrieben, daher verfügt die Anlage über einen mechanischen Verdichter oder thermischen Antrieb sowie ein Expansionsventil. Die Komponenten sind beispielhaft in den Bildern 5.2.9.3-2 bis -4 dargestellt.

Wärmepumpen mit mechanischen Antrieben sind Kompressionswärmepumpen, die nach dem Kompressionskaltdampfprozess arbeiten. Als mechanische Antriebe für den Kompressor kommen Elektromotoren sowie Gas- oder Dieselmotoren in Betracht. Nach heutigem Stand der Technik kommen für Wärmepumpen mit kleinen und mittleren Antriebsleistungen (etwa bis 20 kW) vor allem Elektromotoren in Frage, bei höheren Leistungen auch in stärkerem Maße brennstoffbetriebene Motore.

Thermisch angetriebene Absorptionswärmepumpe haben - obwohl sie nahezu verschleißfrei arbeiten - kaum Verbreitung gefunden und werden hier nicht weiter behandelt.

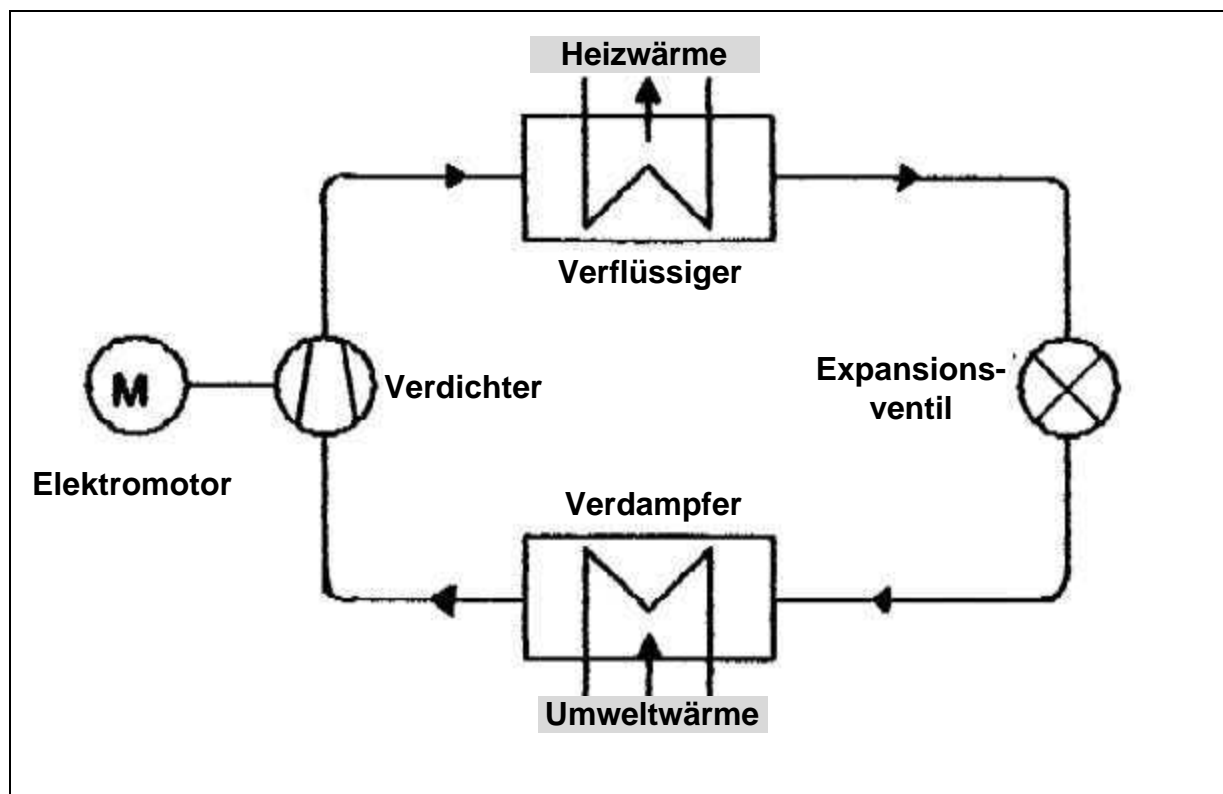


Bild 5.2.9.3-2 Elektrisch betriebene Wärmepumpe

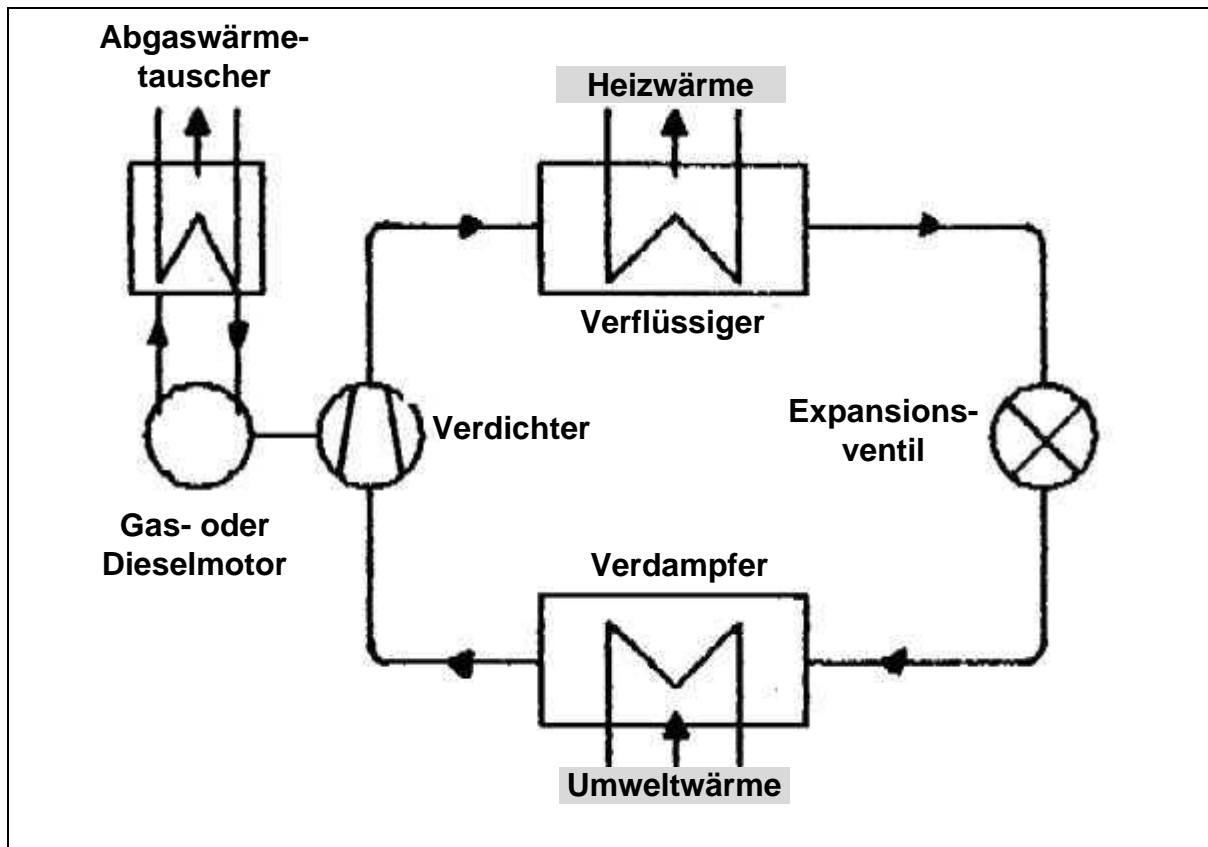


Bild 5.2.9.3-3 Motorbetriebene Wärmepumpe

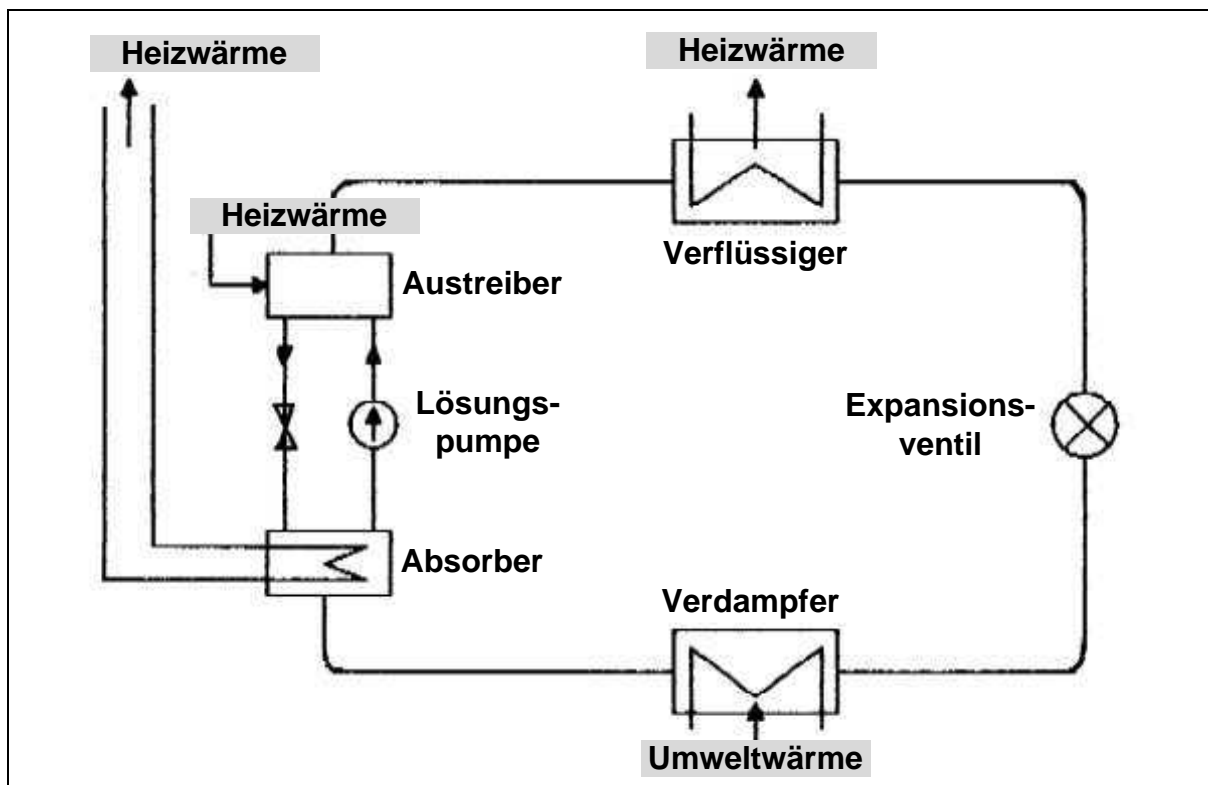


Bild 5.2.9.3-4 Absorptionswärmepumpe

Kältemittel, Ozonschädlichkeit

Der im Kreisprozess einer Wärmepumpe umlaufende Arbeitsstoff wird Kältemittel genannt. Kältemittel sollten folgende Forderungen erfüllen:

- chemische Stabilität auch in Grenzfällen (hohe Temperaturen, Drücke) und in Bezug auf alle im Kreislauf vorhandenen Materialien, kein Wassergehalt im Kältemittel,
- nicht brennbar, nicht explosiv und nicht toxisch,
- günstiger Dampfdruckverlauf: Überdruck bei Verdampfungstemperatur, möglichst niedrige Kondensationsdrücke,
- hohe auf das Volumen bezogene Kälteleistung zur Minimierung der umlaufenden Kältemittelströme und der Komponentengrößen, v.a. des Kompressors.

Chemische und physiologische Anforderungen sind in DIN 8960, Begriffe und Kurzzeichen in DIN 8962 sowie Brennbarkeit und Giftigkeit in DIN EN 378 festgelegt. Am häufigsten werden als Kältemittel halogenierte Kohlenwasserstoffverbindungen eingesetzt:

FCKW	Vollhalogenierte Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe, die je nach Hersteller unterschiedliche Namen tragen: FRIGEN, FREON,...
HFCKW	die seit 1.1. 2000 in Neuanlagen verbotenen FCKW's mit Wasserstoffatomen
(H)FKW:	Fluorierte Kohlenwasserstoffe ohne Chloatome

Neben den organischen Einstoffkältemitteln werden azeotrope Kältemittelgemische (verhalten sich in der Dampf- und Flüssigkeitsphase wie reine Kältemittel) und nichtazeotrope Kältemittelgemische (mit unterschiedlichen „gleitenden“ Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen der Einzelstoffe) sowie anorganische Kältemittel, z.B. Ammoniak eingesetzt. Die chemisch sehr stabilen FCKW-Kältemittel, welche die Anforderungen der Kälte- und Wärmepumpentechnik in der Vergangenheit sehr gut erfüllten, erwiesen sich leider als umweltschädigend. Sie beeinflussen die Ozonschicht in der Stratosphäre und tragen zum Treibhauseffekt bei. HFCKW sind sehr viel weniger stabil und zersetzen sich schon in den unteren Schichten der Erdatmosphäre. (H)FKW schädigen die Ozonschicht nicht.

Durch internationale Vorschriften und Verordnungen sind heute FCKW in Neuanlagen vollständig verboten, HFCKW sollen mittelfristig reduziert werden. Die Verordnungen regeln die Kennzeichnungspflicht der verwendeten Kältemittel, das Verbot des Abblasens, die Rücknahme- und Entsorgungspflicht sowie die damit verbundene Aufzeichnungspflicht. Erstazkältemittel für FCKW stehen heute weitgehend zur Verfügung. Eine größere Verbreitung hat in den letzten Jahren das Propan gefunden. Wegen seiner Brennbarkeit unterliegt es jedoch erheblichen Einschränkungen hinsichtlich der erlaubten Füllmengen.

Wärmequellen und Wärmesenken

Eine entscheidende Bedeutung für die energetische Qualität einer Wärmepumpe hat die Wahl der Wärmequelle. Je höher die Temperatur der Wärmequelle von vornherein ist und je gleichmäßiger sie verfügbar ist, desto geringer werden die Aufwendungen für die Zusatzenergie, die notwendig ist, um diese Wärme nutzbar zu machen.

Eine Übersicht (in Anlehnung an [Bach90]) über die Vor- und Nachteile der verschiedenen Wärmequellen zeigt Tabelle 5.2.9.3-1.

Quelle	Verfügbarkeit		Temperaturbereich der Quelle	Betriebsweise Wärmepumpe	Kosten		Berücksichtigung bei der Gebäudeplanung
	örtlich	zeitlich			Er-schließung	Be-trieb	
Erdreich	befriedigend	gut	-5 ... 10 °C	mono- oder bivalent	hoch	mäßig	nur Grundfläche oder Erdsonden
Grundwasser	seltener	sehr gut	8 ... 12 °C	monoalient	hoch	gering	nur Grundfläche
Oberflächenwasser	sehr selten	gut	0 ... 15 °C	bivalent	mäßig	mäßig	nur Grundfläche
Außenluft	gut	gut	-15 ... 20	bivalent	gering	hoch	nur Grundfläche
Prozessabwärme (z.B. Abluft)	mäßig	gut	über 15°C	mono- oder bivalent	mäßig	gering	teilweise notwendig
Absorberflächen (Energiesammler)	gut	mäßig	-15 ... über 15 °C	bivalent	hoch	hoch	teilweise notwendig

Tabelle 5.2.9.3-1 Wärmequellen für Wärmepumpen

Die am weitesten verbreitete Wärmepumpe ist die elektrisch betriebene Wärmepumpe, wobei heute etwa 85 % aller installierten Geräte Erdreich als Wärmequelle nutzen und der Rest auf Luft und Wasser als Wärmequellen entfallen.

Soll Wasser als Wärmequelle genutzt werden, muss vor der Anschaffung und Inbetriebnahme eine Erlaubnis zur Wassernutzung bei der zuständigen Behörde beantragt werden. Oberflächenwasser dürfen – bis auf sehr wenige Ausnahmen – nicht genutzt werden. Für die Grundwassernutzung müssen (sehr teure) Saug- und Schluckbrunnen errichtet werden.

Erdreich als Wärmequelle erfordert die Verlegung von Rohrschlangen (waagrecht verlegte Erdreichkollektoren) oder Erdspießen (senkrecht in Vorbohrungen eingebrachte Sonden). Beide Systeme werden meist von Sole als Zwischenwärmeträger durchflossen. Seltener werden Verdampferschlangen direkt im Erdreich verlegt, da durch Kältemittelölaustritt bei Undichtigkeiten das Grundwasser gefährdet wird. Bei der flächigen Verlegung ca. 1 m unter der Erdoberfläche sind ca. 20 bis 40 m² Erdreichfläche je kW Heizleistung erforderlich. Für die Tiefennutzung mittels Erdsonden

sind je nach Bodenbeschaffenheit und erforderlicher Heizleistung unterschiedliche Bohrtiefen erforderlich, die durch Fachkundige zu ermitteln sind.

Bewertung des Wärmepumpenprozesses

Der Kreisprozess des Kältemittels wird mit Hilfe der Leistungsziffer (Verhältnis von Leistungen) bzw. der Arbeitszahl (Verhältnis von Energiemengen, z.B. über ein Jahr) bewertet.

Die Leistungsziffer ist: $\varepsilon = \frac{\dot{Q}_H}{P_{El}} \approx 0,2 \dots 0,5 \dots 0,7 \cdot \frac{t_c + 273K}{t_c - t_o}$

Die Arbeitszahl ist: $\beta = \frac{Q_H}{W_{el}} \approx 0,2 \dots 0,5 \dots 0,7 \cdot \frac{t_c + 273K}{t_c + t_o}$

Die Abminderung von 0,2 ... 0,5 ... 0,7 auf die maximal mögliche Leistungsziffer bzw. Arbeitszahl wird als exergetischer Gütegrad bezeichnet. Ein typischer Umrechnungsfaktor ist der Wert 0,5. Größere Werte gelten für große Maschinen. Die Arbeitszahl wird auch COP (coefficient of performance) genannt.

Die benannten Temperaturen sind die Kondensationstemperatur t_c und die Verdampfungstemperatur t_o des Kältemittels in °C. Die Wärmequellentemperatur liegt oberhalb der Verdampfertemperatur t_o , die gewünschte mittlere Heizmitteltemperatur unterhalb der Kondensationstemperatur t_c .

Aus der Formel wird direkt sichtbar, unter welchen Randbedingungen die Arbeitszahl einer Wärmepumpe groß wird. Sie steigt mit kleiner werdendem Abstand zwischen t_c und t_o . Das bedeutet, die Arbeitszahl steigt, je niedriger die Temperatur des Heizmediums (Fußbodenheizung ist günstiger als Trinkwarmwasserbereitung) und je höher die Wärmequellentemperatur sind (Grundwasser oder Erdreich sind besser als Außenluft im Winter). Zum Erreichen einer hohen Arbeitszahl sollte die Wärmequellentemperatur konstant sein oder besser noch bei den höchsten Wärmelasten die höchste Temperatur haben. Oder umgekehrt: die Temperatur des Heizmediums sollte geringer werden, wenn die Wärmequellentemperatur geringer wird. Diese Forderungen werden bei konventionellen Heizungen nicht eingehalten. Die Trends sind gegenläufig. Die Temperatur des Heizmediums wird dann am höchsten, wenn die Temperatur der Quelle in der Regel am kältesten ist: im Winter.

Es gibt immer Bereiche, in denen die Wärmepumpe eine zu große Leistung anbietet und in denen sie knapp oder zu gering dimensioniert ist. Eine Unterdimensionierung führt zu einem bivalenten Heizsystem. Im Bereich eines Leistungsüberangebotes taktet die Wärmepumpe. Bild 5.2.9.3-5 zeigt die Zusammenhänge.

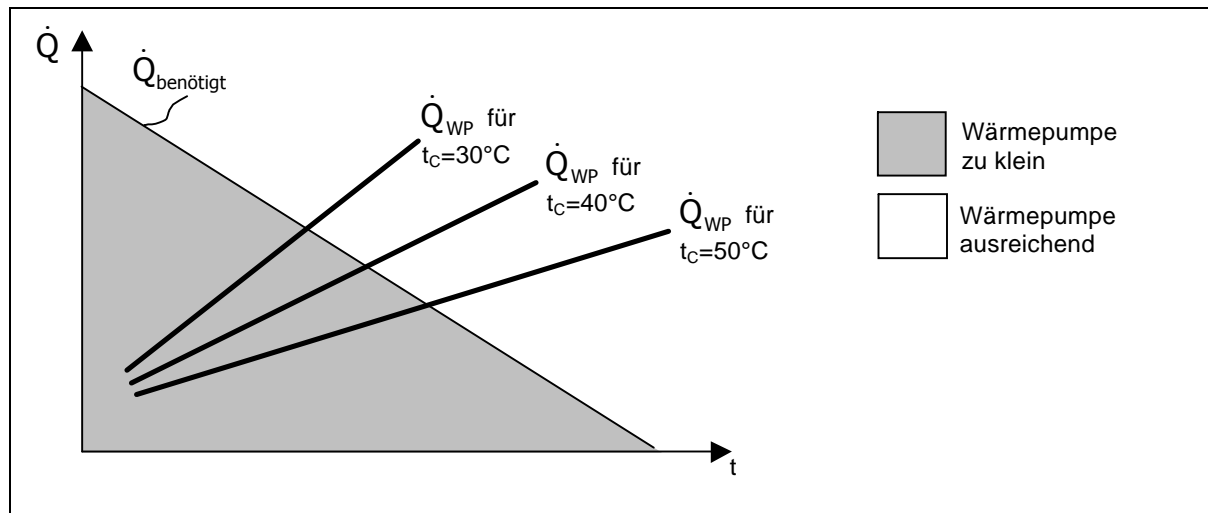


Bild 5.2.9.3-5 Leistungsanforderung und -abgabe einer Wärmepumpe

Auslegung und Betriebsweise einer Wärmepumpe

Die Investitionskosten einer Wärmepumpe und für die zugehörige Wärmequellener-schließung können deutlich über den Kosten eines konventionellen zentralen Kes-sels liegen. Weiterhin ist bei einer zu geringen Dimensionierung mit erhöhten Be-triebskosten zu rechnen, weil die Spitzenlast bei kalten Außentemperaturen dann durch einen zweiten Wärmeerzeuger – heute häufig durch direkte Elektroheizung - gedeckt werden muss. Sowohl Unter- als auch Überdimensionierung muss daher vermieden werden.

Eine Wärmepumpe kann monovalent - d.h. als alleiniger Wärmeerzeuger - oder biva-lent - dann als Grundlastherzeuger - betrieben werden. Der bivalente Betrieb kann parallel oder alternativ erfolgen, siehe Bild 5.2.9.3-6. Erfolgt bei einer Elektro-Kompressionswärmepumpe die Nachheizung ebenfalls elektrisch, wird häufig von monoenergetischem Betrieb gesprochen.

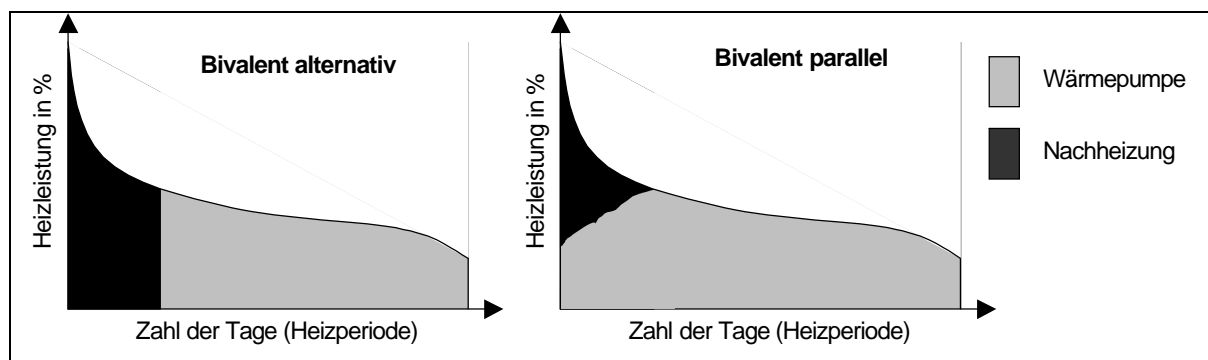


Bild 5.2.9.3-6 Bivalenter Betrieb

- Bivalent parallel: die Wärmepumpe ist als Grundlastherzeuger bis zur geringsten Außentemperatur in Betrieb. Ihre Arbeitszahl sinkt im Winter jedoch. Die Nach-heizung erfolgt ab einer Grenzaußentemperatur mit dem Spitzenlastherzeuger. Von einem bivalenten Teil-Parallel-Betrieb wird gesprochen, wenn im Parallelbe-trieb die Abschalttemperatur der Wärmepumpe oberhalb der niedrigst möglichen Außentemperatur liegt.

- Bivalent alternativ: die Wärmepumpe ist nur bis zu einer minimalen Außentemperatur in Betrieb. Darunter versorgt der Spitzenlastzeuger das Gebäude. Auch der Stromliefervertrag mit dem EVU kann diese Betriebsweise erforderlich machen.

Wird der bivalente Betrieb angestrebt, dann sollte mit einer möglichst kleinen Wärmepumpe mit niedrigen Investitionskosten ein möglichst großer Anteil der benötigten Jahresenergiemenge erbracht werden. Zu Auslegung dienen Nomogramme von Herstellern.

Wärmepumpen für Wasserheizungen

Heizungswärmepumpen werden heute vorwiegend mit Erdreich (monovalent) oder Außenluft (bivalent) als Wärmequelle betrieben. Abluft-Wasser-Wärmepumpen zur Heizung und/oder Trinkwarmwasserbereitung sind nur in Gebäuden mit sehr kleinen Heizwärmebedarfswerten sinnvoll, weil die in der Abluft gespeicherte Wärmemenge begrenzt ist. Eine große Heizleistung kann nur mit hohen Abluftströmen (große Lüftungswärmeverluste), hohen Luftabkühlungen (schlechte Arbeitszahl) oder hoher Nachheizenergie (wirtschaftlich und energetisch nicht sinnvoll) realisiert werden.

Heizwasserpufferspeicher müssen unter bestimmten Randbedingungen eingesetzt werden. Sie können sinnvoll sein, wenn die Wärmespeicherkapazität des Anlagensystems gering ist (meist bei Heizkörper- weniger bei Fußbodenheizungen), wenn die Wärmepumpe in eine Bestandsanlage eingebaut wird (hier vor allem zur hydraulischen Trennung), wenn die Wärmepumpe überdimensioniert ist (Takten vermeiden), bei vorgeschriebenen Sperrzeiten der Elektroenergieversorgung oder in Kombination mit solarer Heizungsunterstützung.

Die Dimensionierung erfolgt in bestehenden Anlagen sinnvoll nach dem Verbrauch des Gebäudes der letzten Jahre. Als Spitzenlastzeuger sollte in diesem Fall ein elektrischer Heizstab o.ä. vorgesehen werden.

Wärmepumpen für Luftheizungen

Die heute in Niedrigeenergiehäusern weit verbreiteten Wärmepumpen sind Abluft-Zuluft-Wärmepumpen. Anstelle bzw. zusätzlich zu einer konventionellen Wärmerückgewinnung überträgt eine Wärmepumpe die in der Abluft enthaltene Wärme auf die Zuluft. Durch den Wärmepumpenprozess kann die Abluft unter die Zulufttemperatur abgekühlt werden. Diese Art der Wärmepumpe eignet sich besonders für Gebäude, die kein konventionelles Heizsystem erhalten sollen - z.B. Passivhäuser. Es ist eine sinnvolle Ergänzung bzw. Ersatz für eine Wärmerückgewinnung mit direkter elektrischer Nachheizung.

Wärmepumpen zur Trinkwarmwasserbereitung

Typische Wärmequellen für Trinkwarmwasser-Wärmepumpen sind Abluft, Kellerluft und Außenluft. Die Geräte werden oftmals als Kompaktgeräte (Speicher und Wärmepumpe sowie elektrische Nachheizung als Einheit) angeboten. Wärmepumpen zur Trinkwarmwasserbereitung können auch als Kombigeräte mit der zentralen Heizung ausgeführt sein.

Umweltgesichtspunkte und Wirtschaftlichkeit

Sofern die elektrisch betriebene Wärmepumpe mit Arbeitszahlen oberhalb 3,0 bzw. Aufwandszahlen unter 0,33 betrieben werden (siehe Kapitel 5.2.2.4.5 und 5.2.2.4.6.), kann von einer positiven Primärenergiebilanz gesprochen werden. Begründung: aus 3 Einheiten Primärenergie (Kohle, Gas, Öl) wird im durchschnittlichen deutschen Kraftwerk eine Einheit Strom erzeugt. Mit diesem Strom wird die Wärmepumpe betrieben und je Einheit Strom drei Einheiten Wärme gewonnen.

Monovalente Wärmepumpen sind überwiegend mit großen Investitionen für die Erschließung der Wärmequelle behaftet (z.B. Erdsonden), wogegen die typischen bivalenten Wärmepumpen (Luftwärmepumpen) selbst nicht so kostenintensiv sind, sie jedoch einen zusätzlichen Spitzenlasterzeuger, der i. d. R. auf die volle Leistung ausgelegt ist, benötigen.

Die Betriebskosten hängen stark von der Anschlussleistung der Wärmepumpe und ggf. gewährten Sonderkonditionen des EVU ab. Müssen längere Sperrzeiten des Strombezugs überbrückt werden, fallen zusätzliche Kosten für Pufferspeicher an. Wird die Spitzenlast elektrisch erzeugt, ist der direkte Strombezug bei falscher Dimensionierung sehr teuer.

Quelle: K. Jagnow und D. Wolff
Manuskript für "Der Energieberater"
Verlag Deutscher Wirtschaftsdienst, Köln, 2003-2009