

Brennstoffleistung, bezogen auf einen bestimmten Anlagenumfang gemäß VDI 2067.

Die **Jahresheizzahl**  $\zeta_a$  einer verbrennungsmotorisch angetriebenen Wärmepumpe oder einer mit Primärenergie betriebenen Absorptionswärmepumpe ist der Quotient aus jährlich gelieferter Wärme zu jährlich aufgenommener Brennstoffenergie, bezogen auf einen bestimmten Anlagenumfang gemäß VDI 2067.

### 3 Grundlagen

#### 3.1 Wärmeregime im Untergrund

Die Oberflächentemperatur der Erde, die weltweit im Mittel bei etwa 13 °C liegt, wird durch ein Gleichgewicht zwischen einstrahlender Sonnenenergie, Wärmestrahlung ins Weltall, geothermischem Wärmefluss und Varianten/Interferenzen dieser Faktoren bestimmt (Bild 1). Wegen der im Verhältnis sehr kleinen Wärmeströme aus dem Erdinneren (0,05 bis 0,12 W/m<sup>2</sup> gegenüber bis zu 1000 W/m<sup>2</sup> Sonnenstrahlung) ist ihr Anteil an der Energiebilanz an der Erdoberfläche jedoch verschwindend gering. Immer, wenn durch Wärmeentzug oder Wärmeeinleitung der natürliche Zustand gestört wird, muss durch Wärmetransport das Wärmedefizit bzw. der Wärmeüberschuss wieder ausgeglichen werden. Der Wärmetransport durch Wärmeleitung und Konvektion (Wärmestrahlung ist im Untergrund zu vernachlässigen) speist sich dann aus allen zur Verfügung stehenden Quellen.

Bei erdgekoppelten Wärmepumpen ist ein hohes Wärmetransportvermögen des Untergrundes erwünscht, da dann die benötigte Wärme besonders gut zu den Brunnen oder Erdreichwärmeübertragern gelangen bzw. von dort in dem Untergrund abgeführt

certain extent of the plant in accordance with VDI 2067.

The **annual performance factor**  $\zeta_a$  of a heat pump driven by a combustion engine or of an absorption heat pump using primary energy, is the quotient of the annually supplied heat to the annually consumed fuel power, related to a certain extent of the plant in accordance with VDI 2067.

### 3 Principles

#### 3.1 Heat regime below ground

The surface temperature of the earth, which on average is at around 13 °C throughout the world, is determined by an equilibrium between the radiating solar energy, thermal radiation into space, geothermal heat flow, and variants/interferences of these factors (Figure 1). Due to the, relatively speaking, very small heat flows from the interior of the earth (0.05 to 0.12 W/m<sup>2</sup> compared to up to 1000 W/m<sup>2</sup> solar radiation) their share of the energy balance at the surface of the earth is rather small. Whenever the natural state is disturbed by heat withdrawal or heat injection, the thermal deficit or thermal surplus must be rebalanced by heat transport. The heat transport through conduction and convection (thermal radiation is to be ignored in the underground) feeds from all available sources.

In the case of ground source heat pumps, it is desirable that the underground has a high heat transport capacity as then the required heat reaches the wells or the ground heat exchangers particularly easily, or rather can be fed away from there in the underground.

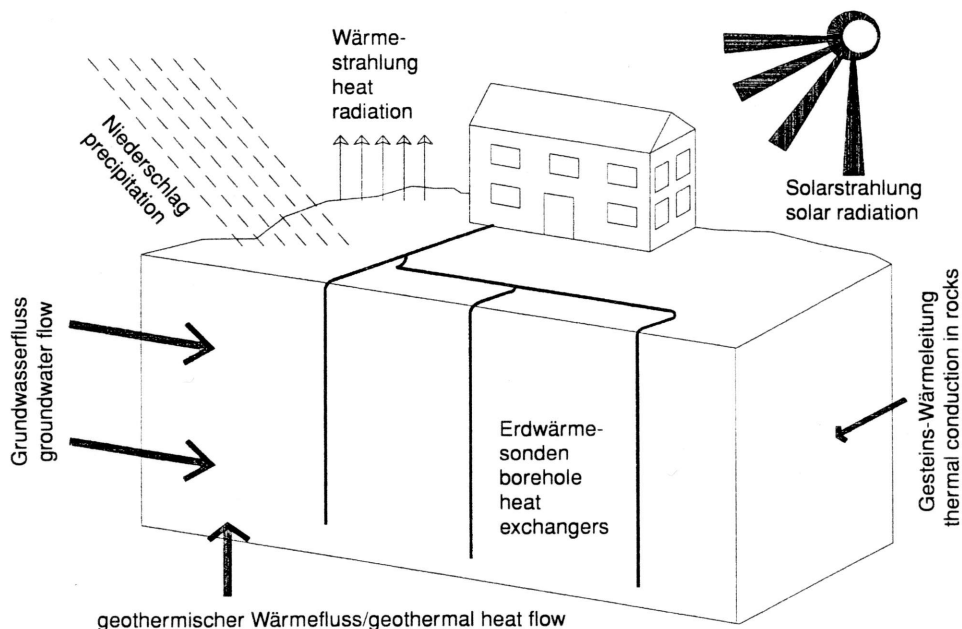


Bild 1. Wärmeregime im oberflächennahen Untergrund

Fig. 1. Thermal regime in the shallow underground

werden kann. Bei unterirdischen thermischen Energiespeichern bedeutet dagegen ein hohes Wärmetransportvermögen gleichzeitig größere Wärme- bzw. Kälteverluste.

Das Wärmetransportvermögen kann für die stationäre Wärmeleitung durch die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  beschrieben werden (in  $W/(m \cdot K)$ ), für instationäre durch die Temperaturleitfähigkeit  $\alpha$  ( $m^2/s$ ). Für den konvektiven Wärmetransport ist die hydraulische Leitfähigkeit der im Untergrund anstehenden Gesteine (Durchlässigkeit, in  $m/s$ ) entscheidend. Für die Speicherung thermischer Energie ist die volumenbezogene spezifische Wärmekapazität  $\rho \cdot c_p$  maßgebend (in  $kJ/(m^3 \cdot K)$ ). Dabei ist sowohl der Gesteins- als auch der Fluidanteil zu berücksichtigen. Beispielwerte für die genannten Parameter enthält Tabelle 1. Die Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen kann in verschiedenen Richtungen unterschiedlich groß sein (anisotrop), z. B. parallel oder senkrecht zur Schichtung bzw. Schieferung in Gesteinen.

Bei der hydraulischen Leitfähigkeit muss je nachdem, ob der Untergrund aus Locker- oder Festgesteinen aufgebaut wird, zwischen Poren- und Trennfugendurchlässigkeit unterschieden werden. Während die hydraulische Leitfähigkeit von Porengrundwasserleitern vor allem von Korngröße und Kornverteilung der Lockergesteine abhängt, wird die hydraulische Leitfähigkeit von Festgesteinen im Wesentlichen durch Häufigkeit und Öffnungsweite der Trennfugen (Schichtfugen, Klüfte, Störungen) bestimmt. Anhaltswerte für die Durchlässigkeit von Lockergesteinen sind der Tabelle 2 zu entnehmen. Festgesteine weisen aufgrund der meist sehr unregelmäßigen Verteilung der Trennfugen größere Variationen hinsichtlich ihrer Wasserdurchlässigkeit auf. Besonders ausgeprägt ist diese Heterogenität bei verkarsteten Festgesteinen; für eine thermische Nutzung sollten sie daher erst nach sorgfältigsten Untersuchungen herangezogen werden.

Der Anteil des geothermischen Wärmeflusses an der thermischen Gesamtbilanz des Untergrundes (Bild 1) variiert mit der Teufe sehr stark. Bei oberflächennahen Anlagen bis zur neutralen Zone in ca. 10 bis 20 m Tiefe, die praktisch nur in Zusammenhang mit erdgekoppelten Wärmepumpen vorkommen, stammt die zum Ausgleich des Wärmedefizits bzw. Wärmeüberschusses verwendete Energie fast ausschließlich aus Sonnenstrahlung und Sickerwasser, so dass man den Einfluss des geothermischen Wärmestromes vernachlässigen kann. Erst zwischen 20 und 100 m Tiefe kann man von einem Anteil des geothermischen Wärmeflusses sprechen. Anlagen größerer Tiefe (ab ca. 100 m) sind dann überwiegend durch den geothermischen Wärmestrom beeinflusst.

In the case of thermal energy storage on the other hand, a high heat transport capacity simultaneous implies greater heat and cold losses.

The heat transport capacity through conduction at steady state can be described by the thermal conductivity  $\lambda$  (in  $W/(m \cdot K)$ ), and for in-stationary conditions by the thermal diffusivity  $\alpha$  ( $m^2/s$ ). The hydraulic conductivity of the rocks in the underground (permeability in  $m/s$ ) is determinant for the convective heat transport. The specific heat capacity ( $\rho \cdot c_p$ ) is determinant for the storage of thermal energy (in  $kJ/(m^3 \cdot K)$ ). Not only the rock proportion but also the liquid proportion must be taken into account. Examples for the named parameters are given in Table 1. The thermal conductivity of rocks can be of different dimensions in different directions (anisotropic), e.g. parallel or perpendicular to the layering or foliation in rocks.

In the case of hydraulic conductivity, depending on whether the underground is built up of unconsolidated or consolidated rock, the differentiation is made between pore and fracture permeability. While the hydraulic conductivity is dependent on pore groundwater conductors, especially particle size and particle distribution, the hydraulic conductivity of consolidated rock is primarily determined by the frequency and opening width of the fractures (fissures, crevices, faults). Guideline values for the permeability of unconsolidated rock are given in Table 2. Consolidated rock displays greater variation in with respect to its water permeability, due to the mostly very irregular distribution of the fractures. This heterogeneity is particularly marked in consolidated rocks; therefore they should only be used for thermal purposes following a thorough investigation.

The contribution of geothermal heat flow in the overall thermal balance of the underground (Figure 1) varies greatly with depth. In the case of plant close to the surface up to the neutral zone at a depth of approx. 10 to 20 m, which are practically only found together with ground source heat pumps, the energy used to equalize the thermal deficit or surplus consists almost exclusively of solar radiation and percolating water, so that the influence of the geothermal heat flow can be ignored. Only at depths between 20 to 100 m a contribution of geothermal heat flow can be observed. Plants at greater depths (from approx. 100 m) are then primarily influenced by the geothermal heat flow.

Tabelle 1. Beispiele für Wärmeleitfähigkeit und volumenbezogene spezifische Wärmekapazität des Untergrundes, bei ca. 20 °C

Gestein	Dichte $\rho$ 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$		volumenbezogene spezifische Wärmekapazität $\rho \cdot c_p$ MJ/(m <sup>3</sup> · K)
		W/(m · K)		
			typischer Rechenwert	
<i>Magmatische Gesteine</i>				
Basalt	2,6–3,2	1,3–2,3	(1,7)	2,3–2,6
Diorit	2,9–3,0	2,0–2,9	(2,6)	2,9
Gabbro	2,8–3,1	1,7–2,5	(1,9)	2,6
Granit	2,4–3,0	2,1–4,1	(3,4)	2,1–3,0
Peridotit	3,0	3,8–5,3	(4,0)	2,7
Rhyolit	ca. 2,6	3,1–3,4	(3,3)	2,1
<i>Metamorphe Gesteine</i>				
Gneis	2,4–2,7	1,9–4,0	(2,9)	1,8–2,4
Marmor	2,5–2,8	1,3–3,1	(2,1)	2,0
Metaquarzit	ca. 2,7	ca. 5,8	(5,8)	2,1
Glimmerschiefer	ca. 2,6	1,5–3,1	(2,0)	2,2
Tonschiefer	2,7	1,5–2,6	(2,1)	2,2–2,5
<i>Sedimentgesteine</i>				
Kalkstein	2,6–2,7	2,5–4,0	(2,8)	2,1–2,4
Mergel	2,5–2,6	1,5–3,5	(2,1)	2,2–2,3
Quarzit	ca. 2,7	3,6–6,6	(6,0)	2,1–2,2
Salz	2,1–2,2	5,3–6,4	(5,4)	1,2
Sandstein	2,2–2,7	1,3–5,1	(2,3)	1,6–2,8
Steinkohle	n.a.	0,3–0,6	(0,3)	1,3–1,8
Ton-/Schluffstein	2,5–2,6	1,1–3,5	(2,2)	2,1–2,4
<i>Lockergesteine</i>				
Kies, trocken	2,7–2,8	0,4–0,5	(0,4)	1,4–1,6
Kies, wassergesättigt	ca. 2,7	ca. 1,8	(1,8)	ca. 2,4
Moräne	n.a.	1,0–2,5	(2,0)	1,5–2,5
Sand, trocken	2,6–2,7	0,3–0,8	(0,4)	1,3–1,6
Sand, wassergesättigt	2,6–2,7	1,7–5,0	(2,4)	2,2–2,9
Ton/Schluff, trocken	n.a.	0,4–1,0	(0,5)	1,5–1,6
Ton/Schluff, wassergesättigt	n.a.	0,9–2,3	(1,7)	1,6–3,4
Torf	n.a.	0,2–0,7	(0,4)	0,5–3,8
<i>Andere Stoffe</i>				
Bentonit	n.a.	0,5–0,8	(0,6)	ca. 3,9
Beton	ca. 2,0	0,9–2,0	(1,6)	ca. 1,8
Eis (-10 °C)	0,919	2,32		1,87
Kunststoff (PE)	n.a.	0,39		n.a.
Luft (0–20 °C, trocken)	0,0012	0,02		0,0012
Stahl	7,8	60		3,12
Wasser (+10 °C)	0,999	0,59		4,15

Tabelle 2. Anhaltswerte für die Durchlässigkeit von Lockergesteinen (in Anlehnung an DIN 18 130-1)

Lockergesteine	Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$ m/s	Bewertung der Durchlässigkeit
reiner Kies	über 10 <sup>-2</sup>	sehr stark durchlässig
sandiger Kies, Mittel-/Grobsand	über 10 <sup>-4</sup> bis 10 <sup>-2</sup>	stark durchlässig
Feinsand, schluffiger Sand	über 10 <sup>-6</sup> bis 10 <sup>-4</sup>	durchlässig
Schluff, toniger Schluff	10 <sup>-8</sup> bis 10 <sup>-6</sup>	schwach durchlässig
Ton, schluffiger Ton	unter 10 <sup>-8</sup>	sehr schwach durchlässig