

Vergleich von Luft/Wasser-Wärmepumpen mit Sole/Wasser-Wärmepumpen - wie sich die Erhöhung der Primärtemperatur auf den Strombedarf auswirkt

Das in der Patentschrift DE 10 2014 008 836 beschriebene Verfahren sowie das in der Gebrauchsmusterschrift DE 20 2019 101 161 beschriebene multifunktionale Regelsystem ermöglichen die Umwandlung von Strom in Wärme sowohl bei den erdgebundenen Sole/Wasser-Wärmepumpen mit der Wärmequelle im Erdreich als auch bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen mit einem Wärmespeicher als Quelle.

Bei Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen verringert sich durch den im Jahresverlauf zunehmenden Wärmebedarf die Quellentemperatur von etwa 10 bis 12°C im Sommer auf etwa 0 bis -2°C im Winter, je nach dem Wärmebedarf kann im Erdreich wieder ausreichend Wärme nachströmen. Ein Nachteil ergibt sich jedoch daraus, dass Wärme im trockenen Erdreich nur sehr langsam fließen kann. Das hat zur Folge, dass in kalten Wintermonaten durch die häufigen Starts der Wärmepumpe die Zeit nicht ausreicht und schließlich die Solevorlauftemperatur nur noch etwa 0°C beträgt.

Dies lässt sich nur durch die mittels des Verfahrens mögliche Regeneration der Wärmequelle ändern. Durch die Zuführung von Wärme in den Primärkreis der Wärmepumpe erhöht sich die Solevorlauftemperatur und aufgrund der gemäß VDI 4650 etwa gleichbleibenden Spreizung auch die Solerücklauftemperatur - dies führt dann dazu, dass die Temperatur der Erdsonde nicht mehr so stark absinkt und das Erdreich im Nahbereich der Sonde dementsprechend nicht mehr so auskühlt wie sonst in der Heizperiode.

Der Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Heizkreis verringert sich auf diese Weise und damit auch der Strombedarf der Wärmepumpe.

Bei Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen ändert sich im Jahresverlauf die Temperatur im Primärkreis der Wärmepumpe erheblich entsprechend der jeweiligen Außenlufttemperatur, die sich ändern kann zwischen 30°C im Sommer und -15°C im Winter.

Dies wirkt sich sehr nachteilig auf die Effizienz der Wärmepumpe aus, weil gerade in der Zeit des höchsten Wärmebedarfs auch von den derzeit sehr stark geförderten Photovoltaikanlagen fast keine Energie mehr zur Verfügung steht (siehe die Ausführungen dazu in der Datei WB2-ZE1).

Die Folge ist ein sehr hoher Stromverbrauch im Winterhalbjahr. Nach Angaben der für Wärmepumpen zuständigen ISE-Gruppe des Inatech-Instituts der Universität Freiburg haben derzeit Außenluft-Wärmepumpen mit ihrem hohen Marktanteil von aktuell etwa 90% bei sehr hohen Heizlasten einen COP-Wert nahe eins und heizen fast nur mit Strom.

Die dennoch geförderten Photovoltaikanlagen führen zu erheblichen Mehrkosten. Von

Photovoltaik. One werden unter anderem auch aktuelle Richtwerte für die Kosten von Photovoltaikanlagen und Wärmepumpen angegeben:

Kosten für eine Luftwärmepumpe

PV-Anlage 8 kW _p	Wärmepumpe	Wärmequelle	Gesamt	Stromspeicher 8 kWh
12.000 €	10.000 - 12.000 €	-----	23.000 €	8.000 €

Kosten für eine Erdwärmepumpe (Sonden)

PV-Anlage 8 kW _p	Wärmepumpe	Wärmequelle	Gesamt	Stromspeicher 8 kWh
12.000 €	10.000 - 14.000 €	15.000 - 20.000 €	42.000 €	8.000 €

Zur Frage, ob sich ein Stromspeicher trotz der hohen Kosten lohnt, heisst es dazu "Ein eigener Stromspeicher macht in Kombination mit einer PV-Anlage Sinn, wenn ausreichend Energie eingespeist wird und wieder abgerufen werden kann. Vor allem dann, wenn mal keine Sonne scheint, lässt sich der klimaneutral gewonnene Strom verwenden. Sinkt nachts der Stromverbrauch eines Haushalts, liefert der Stromspeicher genügend Energie, um alle angeschlossenen Verbraucher zu versorgen." An anderer Stelle heißt es dann aber "dass es allerdings nicht immer möglich ist, das E-Auto komplett mit eigener Sonnenenergie zu versorgen."

Wer sich beim Kauf einer Luft/Wasser-Wärmepumpe für etwa 11.000 € zugleich auch den Empfehlungen entsprechend dafür entscheidet, eine Photovoltaikanlage und einen Stromspeicher anzuschaffen, muss mit zusätzlichen 20.000 € nahezu den dreifachen Preis zahlen - trotz der Fördermaßnahmen sind dies erhebliche Mehrkosten sowohl für den Käufer wie auch für die recht hohen Aufwendungen der Bundesregierung.

Kann man überhaupt davon ausgehen, dass bei dem hohen Wärmebedarf im Winterhalbjahr zukünftig noch ausreichend Strom für Wärmepumpen zur Verfügung stehen wird? Bei der in den nächsten Jahren als Ersatz für Gasheizungen noch stark ansteigenden Zahl von Luft/Wasser-Wärmepumpen müsste über Stromnetze noch erheblich mehr Energie als bisher zur Verfügung stehen, was aber nur mit zahlreichen weiteren Windkraftanlagen möglich sein dürfte, nicht mit Solaranlagen.

Es gibt aber eine ganz andere Lösung für die Probleme mit geringen Kosten

Das zunächst für Sole/Wasser-Wärmepumpen entwickelte Verfahren kann auch sehr gut für Luft/Wasser-Wärmepumpen genutzt werden. Da diese nur relativ geringe Leistungen bis etwa 15 kW haben lässt sich ein deutlich vereinfachtes multifunktionales Regelsystem einsetzen, was zu einem guten Preis-Leistung-Verhältnis führt.

Die Kosten für das innovative Regelsystem dürften bei nicht mehr als etwa 1.500 € bzw. 2.500 € liegen, je nachdem ob das zusätzliche Regelsystem einschließlich Optimierungsprogramm zum Einbau in eine Wärmepumpe an den Hersteller oder für eine Nachrüstung von bereits vorhandenen Wärmepumpenanlagen an einen Installateur geliefert wird.

In der Gebrauchsmusterschrift werden ausführlich Aufbau und Funktion des für die Reeneration der Wärmequelle entwickelten Systems beschrieben (siehe die Datei WB2-ZE2).

Für den Einsatz bei einer Luft/Wasser-Wärmepumpe werden die Funktionen des Regelsystems beibehalten. Nur der Aufbau wird vereinfacht, weil wegen der relativ geringen Leistung auf die Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis der Wärmepumpe in deren Primärkreis während des Ladevorgangs verzichtet werden kann.

Statt dessen ist wie schon für Sole/Wasser-Wärmepumpen beschrieben die bei jedem Start einer Wärmepumpe zunächst noch zu niedrige Heizkreistemperatur zur Nutzung der so entstehenden Anergie für eine Erhöhung der Temperatur im Wärmespeicher einzusetzen (siehe dazu die ausführlichen Beschreibungen am Beispiel einer Erwärmung von Warmwasser in den Dateien WB2-ZE4 und WB2-ZE5).

Außerdem wird stets in den Sommermonaten die hohe Temperatur der Außenluft für die Erhöhung der Temperatur im Wärmespeicher genutzt, bei Bedarf kann dann zeitweise die im Jahresverlauf abnehmende Speichertemperatur durch Umwandlung von Strom aus Windkraftanlagen oder aus dem Netz wieder erhöht werden.

Durch das Optimierungsprogramm des multifunktionalen Regelsystems kann beispielsweise zeitweilig überschüssiger Strom aus Windkraftanlagen auch schon dann genutzt werden, wenn die Temperatur im Wärmespeicher noch sehr hohe Werte von mehr als 20°C erreicht (bei Sole/Wasser-Wärmepumpen wäre das nicht möglich, weil die übertragene Wärme bei zu hohen Temperaturen nicht vollständig im Erdreich gespeichert werden könnte).

Wie die als Anlage beigefügten Grafiken* zeigen führen sehr hohe Temperaturen im Wärmespeicher dazu, dass der Temperaturhub ΔT zwischen Wärmequelle und Heizkreis der Wärmepumpe nur sehr gering ist und so die noch erforderliche elektrische Leistung P_{el} schon ohne eine Photovoltaikanlage deutlich abnimmt.

Auch in kalten Wintermonaten erhöht sich die Temperatur im Wärmespeicher deutlich durch die Nutzung der Anergie und den überschüssigen Strom aus Windkraftanlagen - dies alles ganz im Gegensatz zu den Wärmepumpen gemäß dem aktuellen Stand der Technik, die nach den Angaben von Fraunhofer ISE nur noch durch Strom aus dem Netz die nötige Heizkreistemperatur erreichen können, weil im Winter auch eine vorhandene Photovoltaikanlage nicht mehr die notwendige Energie liefern kann.

* Das allen Wärmepumpen zugrunde liegende grundsätzliche Prinzip ist der beigefügten Darstellung aus dem "Planungshandbuch Wärmepumpen" von NIBE zu entnehmen.

Die Tabelle in Anlage 3 zeigt die Auswirkungen. Wenn bei einer Luft/Wasser-Wärmepumpe gemäß dem aktuellen Stand der Technik die Temperatur im Wärmespeicher von 10°C im Herbst auf nur noch 4°C zum Beginn der winterlichen Heizperiode absinkt, dann erhöht sich bei einer Heizlast von 10 kW die erforderliche elektrische Leistung P_{el} bereits um 26,7%, bei nur noch 0°C sind es bereits 44,4% mehr als im Herbst (2,145 kW statt zuvor 1,485 kW).

Dagegen wird durch das multifunktionale Regelsystem die Speichertemperatur schon bei jedem Start der Wärmepumpe zum Heizen oder für Warmwasser erhöht um den Anteil der zunächst entstehenden Anergie (siehe dazu die Dateien WB2-ZE4 und WB2-ZE5).

Außerdem kann auch im Winter bei Schwachlastzeiten im Stromnetz von Zeit zu Zeit überschüssiger Strom zugeführt werden. Insgesamt könnte dies bei gleicher Heizlast zu einem Anstieg der Temperatur im Wärmespeicher auf beispielsweise 20°C führen und so eine doch erhebliche Einsparung von Strom bewirken.

Betrachtet man dies im Vergleich zur aktuellen Nutzung von Luft/Wasser-Wärmepumpen mit einer elektrischen Leistung von 2,145 kW bei 0°C und zeitweise jetzt noch lediglich 0,825 kW aufgrund der deutlich erhöhten Temperatur im Speicher, so entspricht das einer Verbesserung um etwa 60% !

Bei der Bewertung von Verfahren und multifunktionalem Regelsystem ist einerseits zu berücksichtigen, dass anders als bei den aktuell nutzbaren Wärmepumpen sowohl die entstehende Anergie wie auch in den Schwachlastzeiten der Stromnetze die zeitweise überschüssige Energie genutzt wird zur Erhöhung der Primärtemperatur. Das führt dazu, dass sich die Betriebskosten erheblich durch den niedrigeren jährlichen Stromverbrauch verringern, was sich zugleich günstig auf die bestehende Energiekrise auswirkt.

Andererseits sind auch die höchst unterschiedlichen Beschaffungskosten zu berücksichtigen. Für eine Luft/Wasser-Wärmepumpe ergeben sich für die Photovoltaikanlage mit Stromspeicher zusätzlich 20.000 €, für das multifunktionale Regelsystem dagegen nur etwa 2.000 € - erhebliche Vorteile für den Kauf der Anlage und die staatliche Förderung.

Anlagen

1. Funktion und Aufbau der Wärmepumpe
2. Berechnung der erforderlichen elektrischen Leistung
3. Einfluss der Temperatur im Wärmespeicher auf den Strombedarf einer Luft/Wasser-Wärmepumpe (mit Berechnung der Tabellenwerte)

25.11.2023



WB2-ZE6 (69)

1.3 Funktion und Aufbau der Wärmepumpe

Die prinzipielle Funktion einer Wärmepumpe besteht darin, Wärmeenergie bei einem niedrigen Temperaturniveau aufzunehmen und diese unter Zuführung von mechanischer Energie auf einem höheren, nutzbaren Temperaturniveau wieder abzugeben. Dadurch wird es möglich, die in der Umwelt (Luft, Erdrreich, Wasser) enthaltene Wärmeenergie nutzbar zu machen.

Im Wärmepumpenprozess wird ein Arbeitsmittel, auch als Kältemittel bezeichnet, periodisch verdichtet (komprimiert) und entspannt (expandiert). Im expandierten Zustand wird bei niedriger Temperatur die Wärme aus der Wärmequelle aufgenommen, wobei das Arbeitsmittel verdampft, und im komprimierten, heißen Zustand unter Verflüssigung des Arbeitsmittels wieder abgegeben. Da nach Ablauf eines Arbeitszyklus die Zustandsgrößen des Arbeitsmittels wieder dieselben sind, spricht man bei diesem Vorgang von einem Kreisprozess.

Die wichtigsten Bauteile einer Wärmepumpe sind:

- Verdichter
- Kondensator (Wärmetauscher)
- Expansionsventil
- Verdampfer (Wärmetauscher)

Das Schema einer Wärmepumpe mit den entsprechenden Druck- und Temperaturverhältnissen zeigt Bild 1.2 (Kältemittel R 407C; B0 / W45):

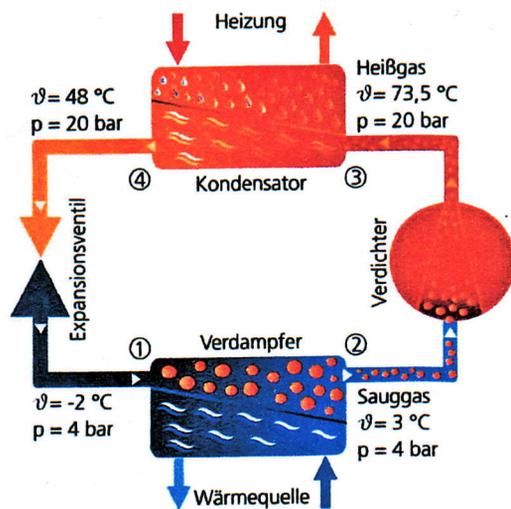


Bild 1.2: Schema eines Wärmepumpenkreislaufs

Der Carnot-Prozess

Allgemein beschreibt der (idealisierte) Carnot-Prozess die Funktion von Wärmekraftmaschinen, die durch periodische Kompression und Expansion Wärme in mechanische Arbeit umwandeln. Wird dieser Kreislaufprozess umgekehrt (links-drehend) durchlaufen, bildet er eine Kraftwärmemaschine ab, die bei tiefen Temperaturen Wärme aus der Umgebung entnimmt und mit von außen zugeführter mechanischer Arbeit bei hoher Temperatur wieder abgibt.

Als Arbeitsmittel wird hierbei ein ideales Gas mit sehr niedrigem Siedepunkt angenommen. Das folgende Bild 1.3 zeigt die vier Phasen des Kreisprozesses im sogenannten T-S-Diagramm:

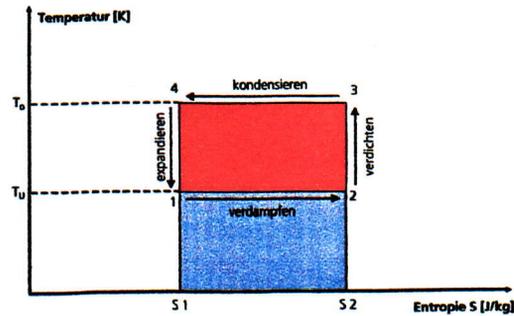


Bild 1.3: Carnot-Prozess

■ Verdampfen (1-2):

Das flüssige Arbeitsmittel wird bei niedrigem Druck und geringer Temperatur verdampft. Die dafür erforderliche Verdampfungswärme wird der Umgebung bzw. Wärmequelle entzogen, hierbei ändert sich die Temperatur nicht (isothermer Vorgang). Durch die Wärmezufuhr bei konstanter Temperatur steigt die Entropie an.

■ Verdichten (2-3):

Mittels mechanischer Arbeit wird das Arbeitsmittel verdichtet und hierbei auf ein höheres Temperaturniveau gebracht. Die Entropie bleibt aufgrund der von außen zugeführten Arbeit konstant (isentropen Vorgang).

■ Kondensieren (3-4):

Im Kondensator wird dem heißen und unter hohem Druck stehenden Arbeitsmittel Wärmeenergie entzogen, so dass es kondensiert. Die Temperatur bleibt hierbei wiederum konstant, da nur die bei 1-2 aufgenommene Verdampfungswärme abgegeben wird (isotherm). Durch die Abgabe der Wärmeenergie bei konstanter Temperatur sinkt die Entropie.

■ Expandieren (4-1):

Das Arbeitsmittel wird entspannt, Druck und Temperatur verringern sich, die Entropie bleibt konstant (isentrop).

Anschaulich stellt die rote Fläche die von dem Verdichter zugeführte Energie dar, während die graue Fläche die aus der Umgebung entnommene Energie abbildet. Das Verhältnis der gesamten abgegebenen Energie (rot+grau) zur von außen zugeführten Energie (rot) entspricht der Leistungszahl des Prozesses, der Carnot-Leistungszahl ϵ_c :

$$\epsilon_c = \frac{T_o}{T_o - T_u} = \frac{T_o}{\Delta T}$$

Es wird deutlich, dass die Leistungszahl vom Temperaturhub abhängt, d.h. von der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und -senke: je geringer die Differenz, umso höher die Leistungszahl.

Beispiel:

$$T_u = 0 \text{ °C} = 273 \text{ K}$$

$$T_o = 40 \text{ °C} = 273 + 40 = 313 \text{ K}$$

$$\epsilon_c = \frac{T_o}{T_o - T_u} = \frac{313}{313 - 273} = 7,83$$

Für den idealen **Carnot-Prozess** ergibt sich die theoretische Leistungszahl ϵ_C aus

$$\epsilon_C = T_o / (T_o - T_u) = T_o / \Delta T \quad (\text{alle Temperaturen in K})$$

mit T_o = Temperatur der Wärmesenke (Heizkreis)

T_u = Temperatur der Wärmequelle (beispielsweise Sole)

ΔT = Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Wärmesenke

Für die Leistungszahl ϵ_{WP} einer realen Wärmepumpe können überschlägig 50% der theoretischen Leistungszahl ϵ_C angesetzt werden,

für **Wärmepumpen** gilt daher $\epsilon_{WP} = 0,5 \cdot \epsilon_C$.

Die Leistungszahl ϵ_{WP} ist das Verhältnis von abgegebener Wärmeleistung P_{th} zu aufgenommener elektrischer Leistung P_{el} .

Beispiel einer Berechnung für eine Fußbodenheizung

mit einer Heizlast (Wärmeleistung) von 10 kW_{therm}

Heizkreistemperaturen = $35/25 \text{ }^\circ\text{C}$, Mittelwert = $30 \text{ }^\circ\text{C} = 303 \text{ K}$ (T_o)

Soletemperaturen (Quelle) = $0/-5 \text{ }^\circ\text{C}$, Mittelwert = $-2,5 \text{ }^\circ\text{C} = 270,5 \text{ K}$ (T_u)

bei Quellentemperatur $0 \text{ }^\circ\text{C}$: Temperaturhub $\Delta T = 303 \text{ K} - 270,5 \text{ K} = 32,5 \text{ K}$

$$\epsilon_{WP} = 0,5 \cdot \epsilon_C = 0,5 \cdot T_o / \Delta T = P_{th} / P_{el}$$

$$\rightarrow P_{el} = P_{th} \cdot \Delta T / 0,5 \cdot T_o = \Delta T \cdot 10 / 151,5 \rightarrow P_{el} = 0,066 \cdot \Delta T$$

Quelle $^\circ\text{C}$	Hub ΔT in K	P_{el} kW
26	6,5	0,429
24	8,5	0,561
22	10,5	0,693
20	12,5	0,825
18	14,5	0,957
16	16,5	1,089
14	18,5	1,221
12	20,5	1,353

Quelle $^\circ\text{C}$	Hub ΔT in K	P_{el} kW
10	22,5	1,485
8	24,5	1,617
6	26,5	1,749
4	28,5	1,881
2	30,5	2,013
0	32,5	2,145
-2	34,5	2,277
-4	36,5	2,409

Anlage 2 Berechnung der erforderlichen elektrischen Leistung für eine Luft/Wasser-Wärmepumpenanlage in Abhängigkeit von der jeweiligen Temperatur im Wärmespeicher

Speicher 0 °C		2 °C	4 °C	6 °C	8 °C	10 °C	Speicher 10 °C
$T_o = 30\text{ °C} = 303\text{ K}$		303 K	$P_{el} = 1,485\text{ kW}$ <u>Bezugswert *</u> für Veränderungen des Strombedarfs je nach der Temperatur im Wärmespeicher				
$T_u = -2,5\text{ °C} = 270,5\text{ K}$		-0,5 °C	1,5 °C	3,5 °C	5,5 °C	7,5 °C	
$\Delta T = 32,5\text{ K}$		30,5 K	28,5 K	26,5 K	24,5 K	22,5 K	
$\varepsilon = 4,661$		4,967	5,316	5,717	6,184	6,733	
$P_{el} = 2,145\text{ kW}$		2,013 kW	1,881 kW	1,749 kW	1,617 kW	1,485 kW	
+ 44,4 % gg. Bezugswert		+ 35,5 %	+ 26,7 %	+ 17,8 %	+ 8,9 %	Bezugswert	
12 °C	14 °C	16 °C	18 °C	20 °C	22 °C	24 °C	* Berechnungen für eine Anlage mit einer Fußbodenheizung mit Heizkreistemperaturen von 35/25 °C und einer Heizlast von 10 kW
303 K	303 K	303 K	303 K	303 K	303 K	303 K	
9,5 °C	11,5 °C	13,5 °C	15,5 °C	17,5 °C	19,5 °C	21,5 °C	
20,5 K	18,5 K	16,5 K	14,5 K	12,5 K	10,5 K	8,5 K	
7,390	8,189	9,182	10,448	12,120	14,428	17,823	
1,353 kW	1,221 kW	1,089 kW	0,957 kW	0,825 kW	0,693 kW	0,561 kW	
- 8,9 %	- 17,8 %	- 26,7 %	- 35,5 %	- 44,4 %	- 53,3 %	- 62,2 %	

Anlage 3 Einfluss der Temperatur im Wärmespeicher auf den Strombedarf einer Luft/Wasser-Wärmepumpe

Berechnung der Tabellenwerte für das Beispiel der Anlage 3

Festlegung eines Bezugswerts zur Ermittlung des jeweiligen Strombedarfs bei unterschiedlichen Temperaturwerten,
beispielsweise für die Speichertemperatur 0°C (Quellentemperatur) gegenüber dem Bezugswert bei 10°C .

Angaben erforderlich beispielsweise zur Heizlast (10 kW) und zu dem Mittelwert der Heizkreistemperaturen (Vorlauf = 35°C , Rücklauf = 25°C), die sich für die Berechnung nicht ändern.

Ermittlung des Temperaturhubs ΔT zwischen Temperatur T_u der Quelle und Temperatur T_o des Heizkreises (dafür ist immer die Temperatur von Grad Celsius umzurechnen in Grad Kelvin $\rightarrow \Delta T = T_o$ minus T_u), für die Berechnung ist jeweils der Mittelwert einzusetzen.

Beispiel für eine Speichertemperatur von 0°C : $\rightarrow \Delta T$ für $T_o = 30^{\circ}\text{C} = 303 \text{ K}$ und $T_u = -2,5^{\circ}\text{C} = 270,5 \text{ K}$
bei einer Spreizung im Primärkreis von 5°C $\rightarrow \Delta T = 32,5 \text{ K}$

Carnot-Formel $\rightarrow \epsilon_c = T_o / \Delta T = 303 / 32,5 = 9,323$

für Wärmepumpen gilt $\epsilon_{WP} = \text{etwa } 50\% \text{ von } \epsilon_c = 9,323 \cdot 0,5 \rightarrow \epsilon_{WP} = 4,661$

Leistungszahl COP = thermische Leistung P_{th} zur elektrischen Leistung P_{el} $\rightarrow P_{th} / P_{el} = \epsilon_{WP}$

Elektrische Leistung $\rightarrow P_{el} = P_{th} / \epsilon_{WP} = 10 \text{ kW} / 4,661 = 2,145 \text{ kW}$

Veränderung gegenüber dem Bezugswert 1,485 kW bei 10°C $\rightarrow 2,145 / 1,485 = +44,4 \%$