

Anhang 2 zum Verfahren zur Steigerung der Effizienz von Wärmepumpenanlagen und zur Regeneration der Wärmequelle

Auswirkungen des Verfahrens bei Radiatoren- und Flächenheizungen und die Möglichkeiten der Systemoptimierung

Der Beschreibung des Verfahrens ist eine Heizungsanlage mit Radiatoren zugrunde gelegt worden mit Heizkreistemperaturen von 45/35°C, um zu zeigen, dass auch bei höheren Betriebstemperaturen (wie beispielsweise bei Bestandsgebäuden oftmals erforderlich) noch beachtliche Stromeinsparungen möglich sind.

Es stellt sich die Frage, welche Einsparungen bei Flächenheizungen zu erwarten sind, die mit einer Heizkreis-Vorlauftemperatur von maximal nur 35°C und nach VDI 4650 mit einer Spreizung im Heizkreis von 5 bis 7 K auszulegen sind.

Das Ergebnis der Berechnungen ist Anlage A2-1 für eine Heizung mit Radiatoren (45/35°C) und Anlage A2-2 für eine Fußbodenheizung (35/29°C) mit einer thermischen Leistung von jeweils 10 kW zu entnehmen.

Die Tabellenwerte zeigen die erforderliche elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Quellentemperatur und damit vom jeweiligen Temperaturhub ΔT - in der oberen Hälfte im normalen Betrieb ohne Wärmetauscher (was zugleich dem Stand der Technik entspricht), in der unteren Hälfte mit zugeschaltetem Wärmetauscher und einer Erhöhung der erforderlichen thermischen Leistung der Wärmepumpe um 4% = 0,4 kW.

Setzt man den Verlust im Wärmetauscher mit 10% an, so verbleiben von der zusätzlichen thermischen Leistungserhöhung um 0,4 kW noch 0,36 kW, die zu der Erhöhung der Quellentemperatur führen.

Dies bedeutet für die Energiebilanz während der Wärmeübertragung, dass sich die Gesamtleistung von 10,4 kW zusammensetzt aus einem Anteil an elektrischer Energie P_{el} , einem Anteil an zusätzlicher thermischer Leistung aus der Wärmeübertragung $P_{WT} = 0,36$ kW und einem Anteil an Erdwärme P_{EW} .

Die in den Tabellen angegebenen prozentualen Veränderungen beziehen sich auf eine Quellenvorlauftemperatur von -2°C, wie sie sich bei winterlichen Betriebsbedingungen mit einer hohen Entzugsleistung bisher oftmals einstellt.

Für die Dauer der Wärmeübertragung wird eine zusätzliche elektrische Leistung benötigt (diese Werte sind jeweils in der letzten Zeile der Tabelle angegeben).

Betrachtet man die Tabellenwerte für die Flächenheizung (Anlage A2-2), so steigt bei einer Zuschaltung des Wärmetauschers beispielsweise bei einer Solevorlauf-temperatur von 0°C (Quelle $0/-5^{\circ}\text{C}$) die erforderliche elektrische Leistung zunächst von $P_{el} = 2,262 \text{ kW}$ auf $2,329 \text{ kW}$, eine Erhöhung um $0,067 \text{ kW} = 2,96\%$. Dennoch ist die erforderliche elektrische Leistung gegenüber dem Bezugswert von $P_{el} = 2,393 \text{ kW}$ immer noch um $2,7\%$ geringer.

Nach dem Ende der Übertragung, wenn die Quellenvorlauf-temperatur allmählich auf $+2^{\circ}\text{C}$ gestiegen ist, verringert sich die dann nur noch erforderliche elektrische Leistung weiter auf einen um $-10,9\%$ ($0,262 \text{ kW}$) niedrigeren Wert ($2,131 \text{ kW}$) als bei einer Anlage gemäß dem Stand der Technik mit einer Quellenvorlauf-temperatur von lediglich -2°C .

Die mit dieser Verfahrensänderung mögliche Erhöhung der Quellentemperaturen wirkt deren durch Wärmeentzug bedingten Rückgang entgegen, da die bei jedem Ladevorgang zur Erdsonde zurückfließende Sole wegen der etwa gleichbleibenden Spreizung nicht mehr so stark abkühlt und dadurch der Wärmeübergang vom Erdreich zur Erdsonde auf einem höheren Temperaturniveau stattfindet, solange noch ein ausreichender Wärmefluss erfolgt.

Das Argument, der Wärmefluss werde sich durch die Erhöhung der Solerücklauf-temperatur verschlechtern, weil die Temperaturdifferenz zum Erdreich kleiner wird, dürfte für die realen Verhältnisse im Erdreich in der näheren Umgebung der Erdsonde nur bedingt zutreffen. Da sich Wärme im trockenen Erdreich nur sehr langsam ausbreiten werden für den Wärmefluss vor allem die ständig durch Ladevorgänge sich ändernden Temperaturschwankungen im Nahbereich der Erdsonde die entscheidende Rolle spielen (siehe dazu auch die ausführliche Beschreibung in Anhang 1).

Je höher aber die Temperatur des Solerücklaufs ist, um so höher bleibt zwangsläufig auch die Temperatur im Erdreich direkt um die Sonde herum, der Wärmeübergang zur Erdsonde findet auf einem höheren Temperaturniveau statt. Dabei spielen nur die Temperaturdifferenzen im Nahbereich der Sonde eine Rolle und nicht die zum einige Meter entfernten umgebenden Erdreich. Die Schwankung der Temperatur in der Erdsonde dürfte etwa der Spreizung im Quellenkreis der Wärmepumpe von ungefähr 5 K entsprechen und sich nicht wesentlich ändern.

Die grafischen Darstellungen in Anlage A2-3 und die zugehörigen Berechnungen in Anlage A2-4 zeigen die Möglichkeiten einer Systemoptimierung durch Variationen bei der Wärmeübertragung anhand von einigen Beispielen.

Bsp. 1 stellt eine Anlage gemäß dem Stand der Technik dar mit einer auf -2°C zurückgegangenen Solevorlauf-temperatur (Quelle $-2/-7^{\circ}\text{C}$) bei winterlichen Betriebsbedingungen (Bezugswerte).

Bsp. 2 zeigt die veränderten Betriebsbedingungen, die sich nach der Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis bei einem Anstieg der Solevorlauftemperatur auf $+2^{\circ}\text{C}$ ergeben. Die bei unveränderter Heizlast von 10 kW erforderliche elektrische Leistung hat sich von $P_{el} = 2,393 \text{ kW}$ um $-10,9\%$ auf $2,131 \text{ kW}$ verringert, die Leistungszahl damit von $4,178$ auf $4,692$ um $12,3\%$ erhöht.

Wie sich ausgehend von diesem Temperaturniveau eine weitere Übertragung von Wärme auswirkt, ist den Beispielen 3 und 4 zu entnehmen.

Die Anhebung der Quelltemperatur im Bsp. 3 um $0,4^{\circ}\text{C}$ (wie bei der Radiatorenheizung) führt aufgrund der unterschiedlichen Temperaturverhältnisse im Heizkreis (mit einer Spreizung von 6 K statt 10 K) zu einem stärkeren Anstieg der erforderlichen elektrischen Leistung ($0,67 \text{ kW}$).

Bei einer Erhöhung der zusätzlichen elektrischen Leistung um $0,4 \text{ kW}$ (wie bei der Radiatorenheizung) ergibt sich gemäß Bsp. 4 eine Erhöhung der Quelltemperatur auf nur noch $0,24^{\circ}\text{C}$ mit der Folge, dass die Wärmeübertragung dadurch entsprechend länger dauert.

Für eine Optimierung des Regelsystems hinsichtlich der unter den jeweils aktuellen Betriebsbedingungen günstigsten Solevorlauftemperatur kann es sinnvoll sein, mit einer dauerhaften Übertragung einer sehr kleinen Wärmemenge aus dem Heizkreis (also bei jedem Ladevorgang) die Quelltemperatur zu stabilisieren, d.h. deren Absinken so weit wie möglich zu verhindern.

Das Leitziel einer weitgehend konstanten möglichst hohen Quelltemperatur lässt sich erreichen durch eine ständige Überwachung von Solevorlauf- und Solerücklauftemperatur mit sehr genauen Temperaturfühlern. Aus deren Temperaturdifferenz lässt sich feststellen, ob bei einem steigenden Wärmebedarf in der verfügbaren Zeit zwischen den Ladevorgängen der Wärmefluss vom Erdreich zur Erdsonde noch ausreicht, den Temperaturrückgang wieder auszugleichen. Sollte das nicht der Fall sein, kann beispielsweise im Regelsystem der Sollwert für die Solevorlauftemperatur herabgesetzt werden und so durch eine größere Temperaturdifferenz zum ungestörten Erdreich der Wärmefluss wieder erhöht werden.

Anlagen:

- A2-1 Einfluss der Quelltemperatur bei einer Radiatorenheizung
- A2-2 Einfluss der Quelltemperatur bei einer Flächenheizung
- A2-3 Einfluss der Wärmeübertragung auf die Quelltemperatur
- A2-4 Berechnungen zu den Beispielen

Anlage gemäß dem Stand der Technik bzw. Anlage mit abgeschaltetem Wärmetauscher (Normalbetrieb) *

	Quelle 0 / -5 °C	2 / -3 °C	4 / -1 °C	6 / 1 °C	8 / 3 °C	10 / 5 °C	12 / 7 °C	14 / 9 °C
- 2 / -7 °C	$T_o = 40 \text{ °C} = 313 \text{ K}$	313 K	313 K	313 K	313 K	313 K	313 K	313 K
313 K	$T_u = - 2,5 \text{ °C} = 270,5 \text{ K}$	- 0,5 °C	1,5 °C	3,5 °C	5,5 °C	7,5 °C	9,5 °C	11,5 °C
- 4,5 °C	$\Delta T = 42,5 \text{ K}$	40,5 K	38,5 K	36,5 K	34,5 K	32,5 K	30,5 K	28,5 K
44,5 K	$\epsilon = 3,682$	3,864	4,065	4,288	4,536	4,815	5,131	5,491
3,517	$P_{el} = 2,716 \text{ kW}$	2,588 kW	2,460 kW	2,332 kW	2,204 kW	2,077 kW	1,949 kW	1,821 kW
<u>2,843 kW</u>	- 4,5 % gg. Bezugswert	- 9,0 %	- 13,5 %	- 18,0 %	- 22,5 %	- 27,0 %	- 31,5 %	- 36,0 %
	$P_{EW} = 7,284 \text{ kW}$	7,412 kW	7,540 kW	7,668 kW	7,796 kW	7,923 kW	8,051 kW	8,179 kW
<u>7,157 kW</u>	+ 1,8 % gg. Bezugswert	+ 3,6 %	+ 5,3 %	+ 7,1 %	+ 8,9 %	+ 10,7 %	+ 12,5 %	+ 14,3 %



Anlage mit zugeschaltetem Wärmetauscher (Übertragung) bei einer Erhöhung um 0,4 °C *

<u>Bezugswerte</u>	Quelle 0,4 / -4,6 °C	2,4 / -2,6 °C	4,4 / -0,6 °C	6,4 / 1,4 °C	8,4 / 3,4 °C	10,4 / 5,4 °C	Diese Werte ergeben sich nach einer zwischenzeitlichen Regeneration der Quelle (power-to-heat)
für alle folgenden Angaben zur elektrischen Leistung und zum Anteil der Erdwärme	$T_o = 39,8 \text{ °C} = 312,8 \text{ K}$	312,8 K	312,8 K	312,8 K	312,8 K	312,8 K	
	$T_u = - 2,1 \text{ °C} = 270,9 \text{ K}$	- 0,1 °C	1,9 °C	3,9 °C	5,9 °C	7,9 °C	
	$\Delta T = 41,9 \text{ K}$	39,9 K	37,9 K	35,9 K	33,9 K	31,9 K	
	$\epsilon = 3,733$	3,920	4,127	4,356	4,613	4,903	
	$P_{el} = 2,786 \text{ kW}$	2,653 kW	2,520 kW	2,387 kW	2,254 kW	2,121 kW	
	- 2,0 % gg. Bezugswert	- 6,7 %	- 11,4 %	- 16,0 %	- 20,7 %	- 25,4 %	
	$P_{EW} = 7,254 \text{ kW}$	7,387 kW	7,520 kW	7,653 kW	7,786 kW	7,919 kW	
	+ 1,4 % gg. Bezugswert	+ 3,2 %	+ 5,1 %	+ 6,9 %	+ 8,8 %	+ 10,6 %	

zusätzl. elektr. Leistung + 2,57 % + 2,51 % + 2,44 % + 2,36 % + 2,27 % + 2,12 %

Anlage gemäß dem Stand der Technik bzw. Anlage mit abgeschaltetem Wärmetauscher (Normalbetrieb) *

	Quelle 0 / -5 °C	2 / -3 °C	4 / -1 °C	6 / 1 °C	8 / 3 °C	10 / 5 °C	12 / 7 °C	14 / 9 °C
- 2 / -7 °C	$T_o = 32\text{ °C} = 305\text{ K}$	305 K	305 K	305 K	305 K	305 K	305 K	305 K
305 K	$T_u = - 2,5\text{ °C} = 270,5\text{ K}$	- 0,5 °C	1,5 °C	3,5 °C	5,5 °C	7,5 °C	9,5 °C	11,5 °C
- 4,5 °C	$\Delta T = 34,5\text{ K}$	32,5 K	30,5 K	28,5 K	26,5 K	24,5 K	22,5 K	20,5 K
36,5 K	$\varepsilon = 4,420$	4,692	5,000	5,351	5,755	6,224	6,778	7,439
4,178	$P_{el} = 2,262\text{ kW}$	2,131 kW	2,000 kW	1,869 kW	1,738 kW	1,606 kW	1,475 kW	1,344 kW
<u>2,393 kW</u>	- 5,5 % gg. Bezugswert	- 10,9 %	- 16,4 %	- 21,9 %	- 27,4 %	- 32,9 %	- 38,4 %	- 43,8 %
	$P_{EW} = 7,738\text{ kW}$	7,869 kW	8,000 kW	8,131 kW	8,262 kW	8,394 kW	8,525 kW	8,656 kW
<u>7,607 kW</u>	+ 1,7 % gg. Bezugswert	+ 3,4 %	+ 5,2 %	+ 6,9 %	+ 8,6 %	+ 10,3 %	+ 12,1 %	+ 13,8 %



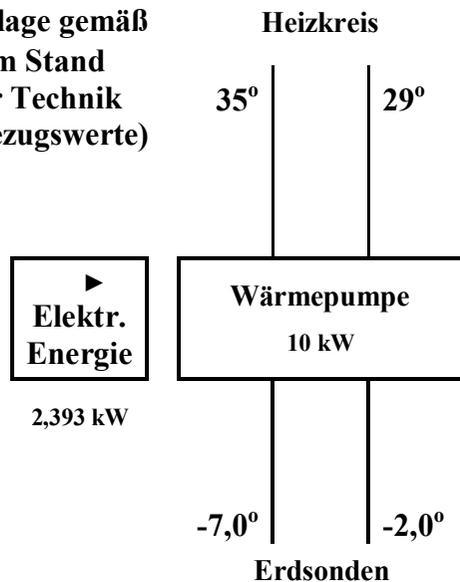
Anlage mit zugeschaltetem Wärmetauscher (Übertragung) bei einer Erhöhung um 0,24 °C *

<u>Bezugswerte</u>	Quelle 0,24 / -4,76 °C	2,24 / -2,76	4,24 / -0,76	6,24 / 1,24	8,24 / 3,24	10,24 / 5,24	Diese Werte ergeben sich nach einer zwischenzeitlichen Regeneration der Quelle (power-to-heat)
für alle folgenden Angaben zur elektrischen Leistung und zum Anteil der Erdwärme	$T_o = 31,88\text{ °C} = 304,88\text{ K}$	304,88 K	304,88 K	304,88 K	304,88 K	304,88 K	
	$T_u = - 2,26\text{ °C} = 270,74\text{ K}$	- 0,26 °C	1,74 °C	3,74 °C	5,74 °C	7,74 °C	
	$\Delta T = 34,14\text{ K}$	32,14 K	30,14 K	28,14 K	26,14 K	24,14 K	
	$\varepsilon = 4,465$	4,743	5,058	5,417	5,832	6,315	
	$P_{el} = 2,329\text{ kW}$	2,193 kW	2,056 kW	1,920 kW	1,783 kW	1,647 kW	
	- 2,7 % gg. Bezugswert	- 8,4 %	- 14,1 %	- 19,8 %	- 23,5 %	- 31,2 %	
	$P_{EW} = 7,711\text{ kW}$	7,847 kW	7,984 kW	8,120 kW	8,257 kW	8,393 kW	
	+ 1,4 % gg. Bezugswert	+ 3,1 %	+ 4,9 %	+ 6,7 %	+ 8,5 %	+ 10,3 %	

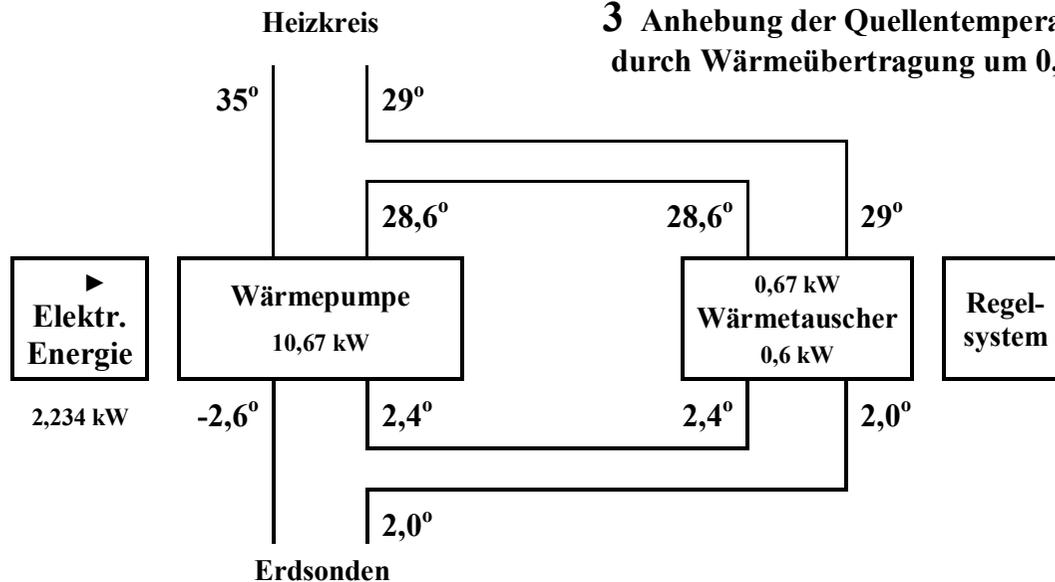
* Alle Berechnungen für eine Flächenheizung bei einer Anlage mit einer Heizlast von 10 kW und Heizkreistemperaturen von 35/29 °C

zusätzl. elektr. Leistung + 2,96 % + 2,90 % + 2,80 % + 2,73 % + 2,59 % + 2,55 %

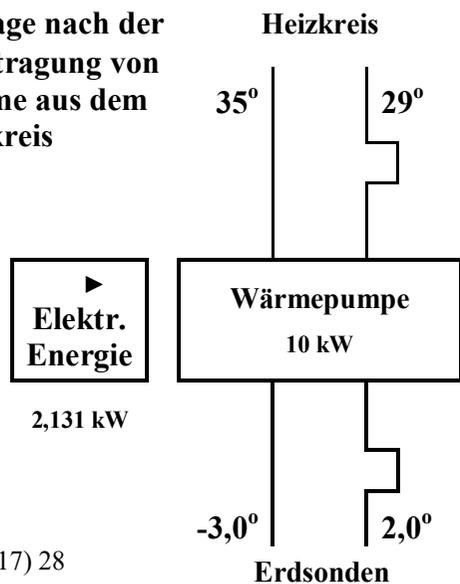
1 Anlage gemäß dem Stand der Technik (Bezugswerte)



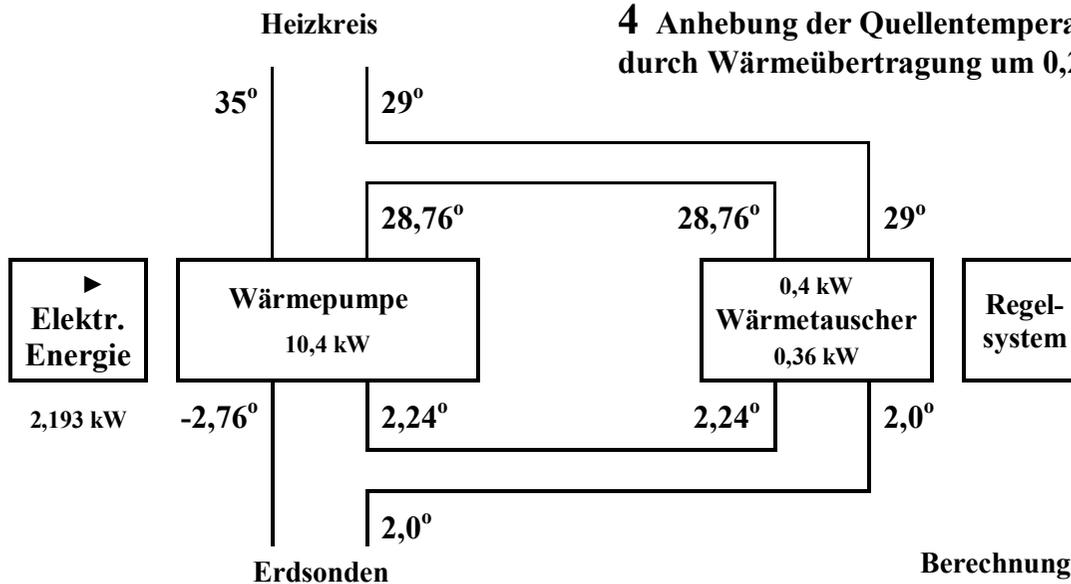
3 Anhebung der Quellentemperatur durch Wärmeübertragung um 0,4°C



2 Anlage nach der Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis



4 Anhebung der Quellentemperatur durch Wärmeübertragung um 0,24°C



WO (17) 28

Berechnungen siehe Anlage A2-4

Anlage A 2-3 Einfluss der Wärmeübertragung auf die Quellentemperatur bei einer Flächenheizungsanlage
Erhöhung um 0,4°C (oben) bzw. Erhöhung um 0,4 kW (unten) wie bei der Radiatorenheizungsanlage (Anlage A2-1)

1 Winterliche Betriebsbedingungen einer Anlage gemäß dem Stand der Technik (Bezugswerte)

Quelle - 2 / - 7 °C

$$P_{th} = 10,0 \text{ kW}$$

$$T_o = 32 \text{ °C} = 305 \text{ K}$$

$$T_u = - 4,5 \text{ °C} = 268,5 \text{ K}$$

$$\Delta T = 36,5 \text{ K}$$

$$\varepsilon = 4,178$$

$$P_{el} = 2,393 \text{ kW}$$

= Bezugswert

$$P_{EW} = 7,607 \text{ kW}$$

= Bezugswert

2 Winterliche Betriebsbedingungen nach einer Übertragung von Wärme aus dem Heizkreis

Quelle 2 / -3 °C

$$P_{th} = 10,0 \text{ kW}$$

$$T_o = 32 \text{ °C} = 305 \text{ K}$$

$$T_u = - 0,5 \text{ °C} = 272,5 \text{ K}$$

$$\Delta T = 32,5 \text{ K}$$

$$\varepsilon = 4,692$$

$$P_{el} = 2,131 \text{ kW}$$

- 10,9 % gg. Bezugswert

$$P_{EW} = 7,869 \text{ kW}$$

+ 3,4 % gg. Bezugswert

3 Betriebsbedingungen zu Beginn einer neuen Übertragung von Wärme bei einer Anhebung um 0,4 °C

Quelle 2,4 / - 2,6 °C

$$P_{th} = 10,67 \text{ kW}$$

$$T_o = 31,8 \text{ °C} = 304,8 \text{ K}$$

$$T_u = - 0,1 \text{ °C} = 272,9 \text{ K}$$

$$\Delta T = 31,9 \text{ K}$$

$$\varepsilon = 4,777$$

$$P_{el} = 2,234 \text{ kW}$$

- 6,7 % gg. Bezugswert

$$P_{EW} = 7,836 \text{ kW}$$

+ 3,0 % gg. Bezugswert

4 Betriebsbedingungen zu Beginn einer neuen Übertragung von Wärme bei einer Anhebung um nur 0,24 °C

Quelle 2,24 / - 2,76 °C

$$P_{th} = 10,4 \text{ kW}$$

$$T_o = 31,88 \text{ °C} = 304,88 \text{ K}$$

$$T_u = - 0,26 \text{ °C} = 272,74 \text{ K}$$

$$\Delta T = 32,14 \text{ K}$$

$$\varepsilon = 4,743$$

$$P_{el} = 2,193 \text{ kW}$$

- 8,4 % gg. Bezugswert

$$P_{EW} = 7,847 \text{ kW}$$

+ 3,1 % gg. Bezugswert

Anlage A2-4 Berechnungen zu den Beispielen für eine Wärmepumpenanlage mit einer Flächenheizung mit Heizkreistemperaturen von 35/29 °C (grafische Darstellungen siehe Anlage A2-3)