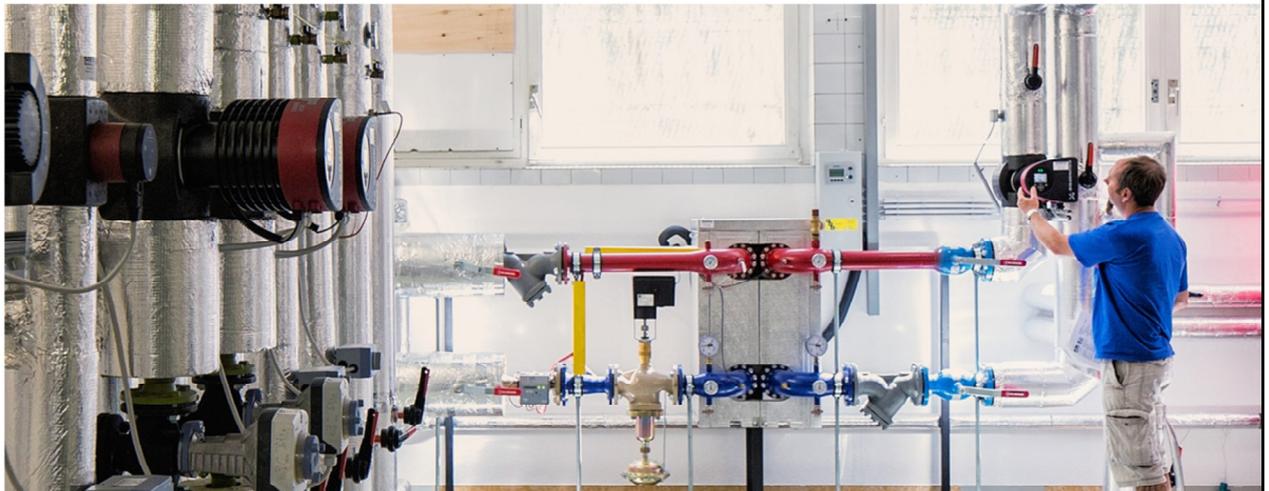


Solarthermische Erdsondenregeneration

Energetische, kostentechnische und wirtschaftliche Optimierung

21. Jänner 2021



Thomas Roßkopf-Nachbaur MSc



Energieinstitut Vorarlberg

Endbericht

Thomas Roßkopf-Nachbaur MSc

Solarthermische Erdsondenregeneration

Übersicht

- Projekt Hammerer
- Gesetzliche Grundlagen
- Variantensimulation
 - Randbedingungen: Mustergebäude, Erdreichbeschaffenheit
 - Haustechnikschemas: Grundsystem ohne Regeneration, Solarthermische Regeneration
 - Detailauswertung Temperaturverlauf Erdsonde
 - Ermittlung Größe Solarthermie und Puffervolumen
 - Auswertung Reduktion Sondenlänge und Strombedarf durch solarthermische Regeneration
- Wirtschaftlichkeit
 - Kostenschätzung
 - Statische Amortisation
- Fazit

Projekt Hammerer

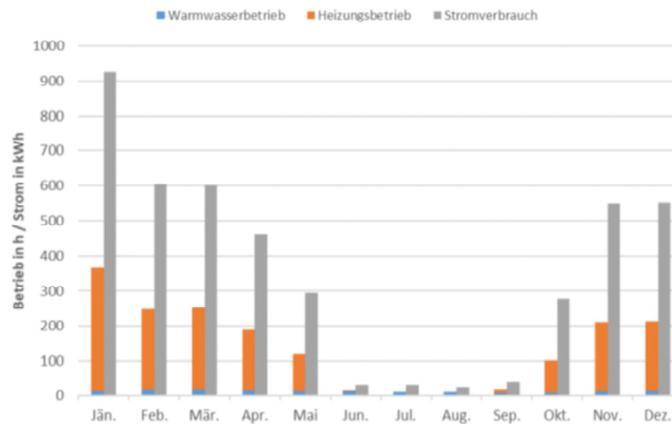
Ausgangslage

- Teilweise saniertes Einfamilienhaus in Bizau, 1 Bewohner
- Wärmeabgabe: Heizkörper (Hochtemperatursystem)
- Kein Pufferspeicher zwischen Wärmeabgabesystem und Wärmeerzeuger
- Nicht modulierende Sole-Wärmepumpe mit 6 Erdreichkörben
 - B0/W35 (Soletemperatur 0°C, Heizungswassertemperatur 35°C): Heizleistung = 8,13 kW; COP = 4,7
 - B0/W55: Heizleistung = 6,53 kW; COP = 2,3
 - Integrierter Warmwasserspeicher: 180 Liter Volumen
- Erdreichkörbe
 - Entzugsleistung laut Datenblatt: 0,7 – 1,0 kW pro Erdreichkorb → 4,2 – 6,0 kW für alle 6 Erdreichkörbe (für 1.800 Volllaststunden gewährleistet!)
 - Durchschnittliche Wärmeentzugsleistung = 3,9 kW → Heizleistung = 6,5 kW und JAZ = 2,5 (geschätzter Wert: Hochtemperaturwärmeabgabesystem!)
 - Rechnerisch ausreichend groß dimensionierte Erdreichkörbe!

Detaillierte Beschreibung siehe: Polysun Simulationsbericht – Projekt Hammerer, Bizau

Projekt Hammerer

Gemessene Betriebsstunden und Stromverbrauch Wärmepumpe, 2019

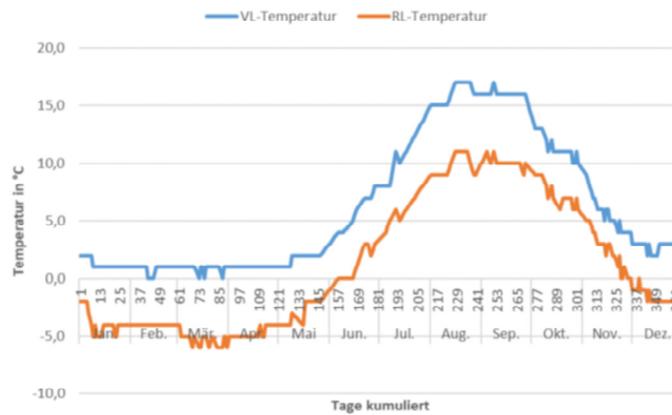


Geringe Betriebsstunden für die Warmwasserbereitung (nur 1 Bewohner) → Großteil des Gesamtwärmebedarfs des Gebäudes entfällt auf die Heizung!

Detaillierte Beschreibung siehe: Polysun Simulationsbericht – Projekt Hammerer, Bizau

Projekt Hammerer

Gemessener Temperaturverlauf Vor- und Rücklauftemperatur Solekreis im Betrieb, 2019

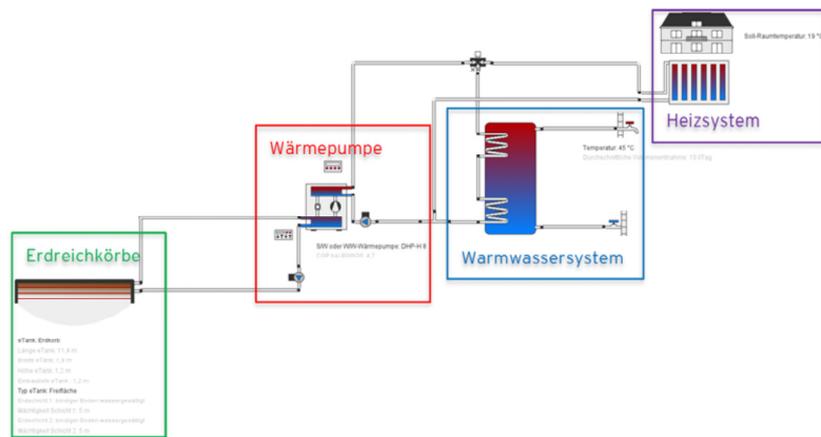


Negative Temperatur des Solekreislauf von Jänner bis April!

Detaillierte Beschreibung siehe: Polysun Simulationsbericht – Projekt Hammerer, Bizau

Projekt Hammerer

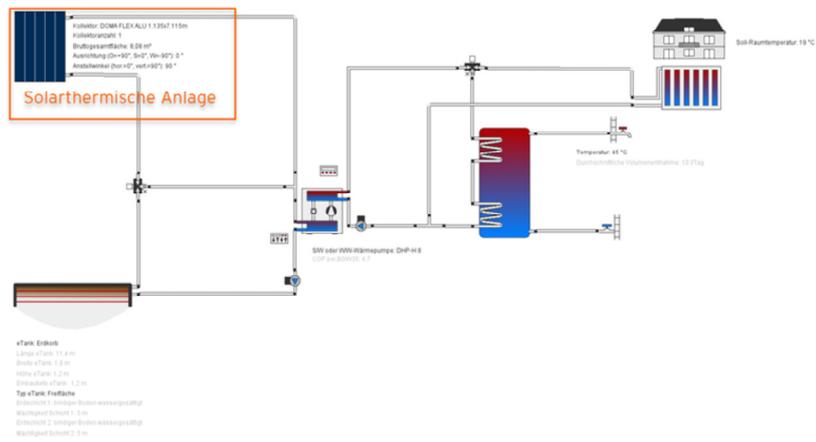
Simulationsschema Bestand



Detaillierte Beschreibung siehe: Polysun Simulationsbericht – Projekt Hammerer, Bizau

Projekt Hammerer

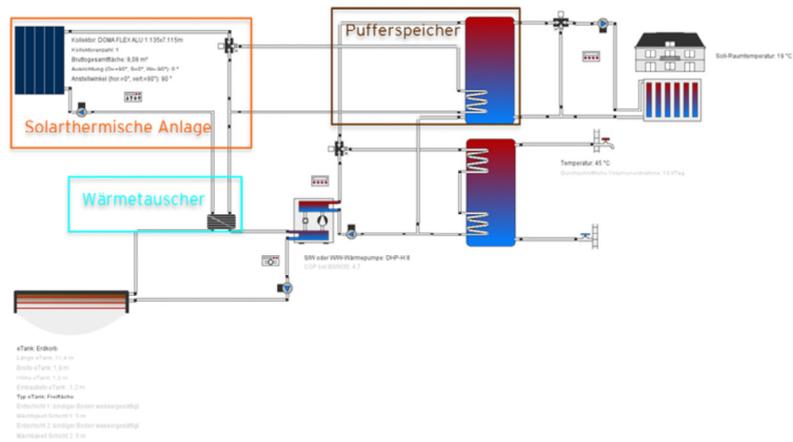
Simulationsschema Solarthermische Regeneration



Detaillierte Beschreibung siehe: Polysun Simulationsbericht – Projekt Hammerer, Bizau

Projekt Hammerer

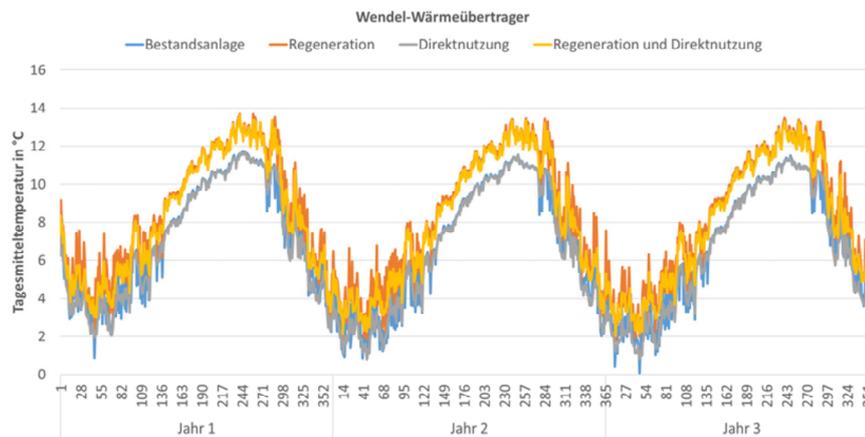
Simulationsschema Solarthermische Regeneration Direktnutzung



Detaillierte Beschreibung siehe: Polysun Simulationsbericht – Projekt Hammerer, Bizau

Projekt Hammerer

Tagesmitteltemperatur Wendel-Wärmeübertrager



Temperatur Wendel-Wärmeübertrager = Mittlere Temperatur Solekreislauf
Solarthermische Regeneration → Tagesmitteltemperaturen +2 K!

Energieinstitut Vorarlberg | © 2021

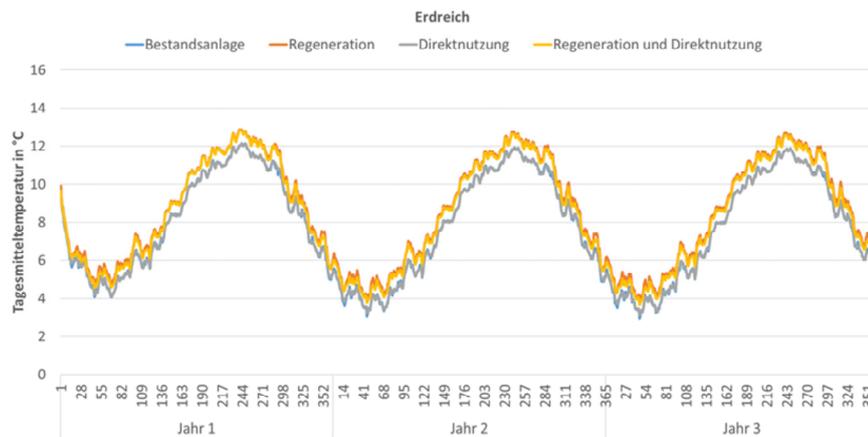
| 10



Detaillierte Beschreibung siehe: Polysun Simulationsbericht – Projekt Hammerer, Bizau

Projekt Hammerer

Tagesmitteltemperatur Erdreich



Solarthermische Regeneration → Tagesmitteltemperaturen nur +1 K!
 Trägers wärmephysikalischen Verhalten des Erdreichs im Vergleich zur Sole!

Energieinstitut Vorarlberg | © 2021

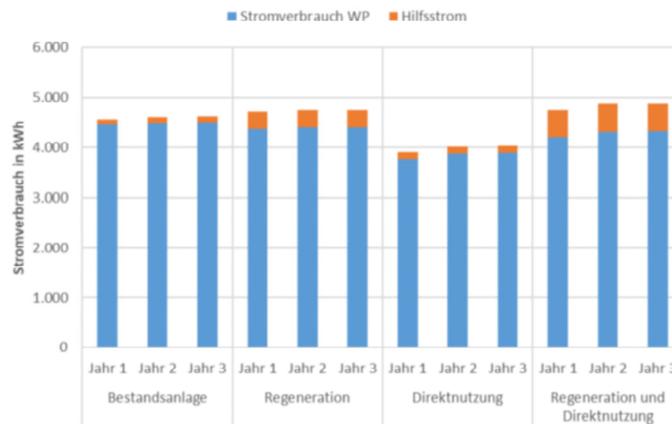
| 11



Detaillierte Beschreibung siehe: Polysun Simulationsbericht – Projekt Hammerer, Bizau

Projekt Hammerer

Stromverbrauch Wärmepumpe und Hilfsantriebe



Solarthermische Regeneration: Geringe WP-Effizienzverbesserung, jedoch höherer Hilfsstrombedarf!
Solarthermische Regeneration: bestes Ergebnis, jedoch nur geringe Reduktion (ca. 500 kWh)

Detaillierte Beschreibung siehe: Polysun Simulationsbericht – Projekt Hammerer, Bizau

Projekt Hammerer

Fazit

- Direkte Solarertragsnutzung: aufgrund geringem Warmwasserwärmebedarf nur geringe Energieeinsparung möglich (ca. 500 kWh) → **nicht empfehlenswert!**
- Kombination Solarthermischer Regeneration und Direktnutzung: Erhöhung der Erdreichtemperatur (vor allem im Sommer) aber erhöhter Hilfsstrombedarf → Verschlechterung der Energieeffizienz → **nicht empfehlenswert!**
- Vollständige Solarthermische Regeneration: Erhöhung der Erdreichtemperatur um ca. 1 K aber längerer Betrieb der Solekreispumpe → höherer Gesamtstrombedarf → **nicht empfehlenswert!**

Detaillierte Beschreibung siehe: Polysun Simulationsbericht – Projekt Hammerer, Bizau

Gesetzliche Grundlagen – ÖWAV-Regelblatt 207

Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds – Heizen und Kühlen

- Heizbetrieb
 - Mittlere Temperatur des **Wärmeträgermediums** (Mittelwert EWS Ausgangs- und EWS Eingangstemperatur) $\geq -1,5\text{ °C}$ → **Auslegungsgröße bei Erdsondenreduktion**
 - Gilt nach Erreichen eines neuen Gleichgewichtszustandes (nach 5 bis 50 Jahren)
 - Beispiel: Eintrittstemperatur -3 °C und Austrittstemperatur 0 °C
- Kühlbetrieb: Temperatur des **Wärmeträgermediums** $\leq 30\text{ °C}$ → **Regelungsgröße bei solarthermischer Erdsondenregeneration**

Durch das ÖWAV-Regelblatt 207 ist die thermische Nutzung des Untergrunds in Österreich geregelt. Im Heizbetrieb darf die mittlere Temperatur des Wärmeträgermediums nach Erreichen eines neuen Gleichgewichtszustandes (üblicherweise nach 5 bis 50 Jahren Betrieb) zu keinem Zeitpunkt $-1,5\text{ °C}$ unterschreiten. Die mittlere Temperatur des Wärmeträgermediums entspricht dem Mittelwert der Ein- und Austrittstemperatur der Erdwärmesonde. Im Kühlbetrieb darf die mittlere Temperatur des Wärmeträgermediums 30 °C nicht überschreiten.

Variantsimulation

Erdsondenreduktion durch solarthermische Regeneration

- **Ziel:** Ermittlung der **möglichen Erdsondenreduktion** durch solarthermische Regeneration mit Einhaltung des $-1,5\text{ °C}$ -Grenzwerts
- Durchführung mit Simulationsprogramm Polysun
 - 2 Mustergebäude: EFH klein, MFH mittel
 - 3 Gebäudehüllqualitäten: 14er-, 12er- und 10er-Linie
 - Mit und ohne Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
 - 2 Erdreichbeschaffenheiten: „Gut“ und „Mittel“
 - Auswertung der Ergebnisse für das 6. Betriebsjahr

Das Ziel des Projektes ist die Erdsondenreduktion für verschiedene Mustergebäude und Erdreichbeschaffenheiten zu ermitteln, die durch solarthermische Regeneration mit gleichzeitiger Einhaltung des $-1,5\text{ °C}$ -Grenzwerts möglich sind. Die Untersuchung erfolgt für zwei verschiedene Mustergebäude (kleines Einfamilienhaus und mittelgroßes Mehrfamilienhaus) mit drei verschiedenen Gebäudehüllqualitäten und zwei verschiedenen Lüftungsarten an zwei Standorten mit unterschiedlicher Erdreichbeschaffenheit: insgesamt 24 Varianten. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt für das 6. Betriebsjahr um im Bereich des neuen Gleichgewichtszustandes zu liegen.

Mustergebäude

Geometrische Angaben

EFH klein



BGF = 157,6 m²
WNF = 112,3 m²
A/V = 0,78
Fensterflächenanteil (bezogen auf WNF) = 26,7%
Fensterflächenanteil (bezogen auf AW) = 13,8%

MFH mittel



BGF = 1.822,4 m²
WNF = 1.263 m²
A/V = 0,40
Fensterflächenanteil (bezogen auf WNF) = 23,5%
Fensterflächenanteil (bezogen auf AW) = 30,9%

Energieinstitut Vorarlberg | © 2021

| 16



BGF = Bruttogeschoßfläche, WNF = Wohnnutzfläche, A/V = Oberflächen-Volumen-Verhältnis, AW = Außenwand

Mustergebäude

Wärmebedarf nach OIB-Richtlinie 6 (2019) am Standort Bregenz

HWB-Linie nach OIB-Richtlinie 6 (2015)			14er		12er		10er	
Wärmerückgewinnung			Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja
EFH klein	HWB _{SK}	kWh/(m ² _{BGF} *a)	48,4	40,2	41,6	32,1	34,8	24,2
	WWWB	kWh/(m ² _{BGF} *a)	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7
MFH mittel	HWB _{SK}	kWh/(m ² _{BGF} *a)	32,7	21,3	28,9	16,3	24,9	11,6
	WWWB	kWh/(m ² _{BGF} *a)	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2

Die verschiedenen Gebäudehüllqualitäten sind nach den Heizwärmebedarfslinien (14, 12 oder 10 x (1 + 3 x A/V)) festgelegt. Die U-Werte der thermischen Gebäudehülle sind so gewählt, dass der nach der alten OIB-Richtlinie 6 (2015) berechnete HWB_{Ref,SK} (Referenz-Heizwärmebedarf am Standortklima) genau auf der Heizwärmebedarfslinie liegt. Für die Untersuchung wird jedoch der HWB_{SK} (Heizwärmebedarf am Standortklima) nach der neuen OIB-Richtlinie 6 (2019) verwendet. Dieser ist im Vergleich zum 2015er-Berechnungsverfahren um etwa 1,5 – 2 kWh/(m²_{BGF}*a) (EFH klein) und 2 – 3 kWh/(m²_{BGF}*a) (MFH mittel) höher. Der HWB_{SK} ist für die beiden Mustergebäude für drei verschiedenen Gebäudehüllqualitäten und zwei verschiedenen Lüftungsarten in obenstehender Tabelle angegeben. Der WWWB (Warmwasserwärmebedarf) nach OIB-Richtlinie 6 (2019) ist ebenfalls angegeben.

Erdreichbeschaffenheit

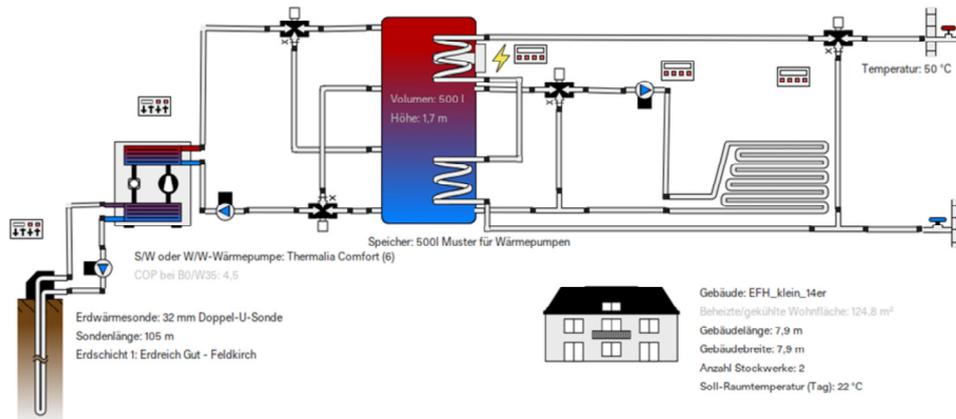
Physikalische Werte

- Wärmeleitfähigkeit
 - Erdreich „Gut“ – Standort Feldkirch = $3,04 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
 - Erdreich „Mittel“ – Standort Lustenau = $2,36 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
- Dichte = $2.100 \text{ kg}/\text{m}^3$
- Spezifische Wärmekapazität = $1.095 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

Die hier angegebenen, durchschnittlichen Wärmeleitfähigkeiten stammen von Thermal Response Tests an den angegebenen Standorten.

Haustechnikschemas

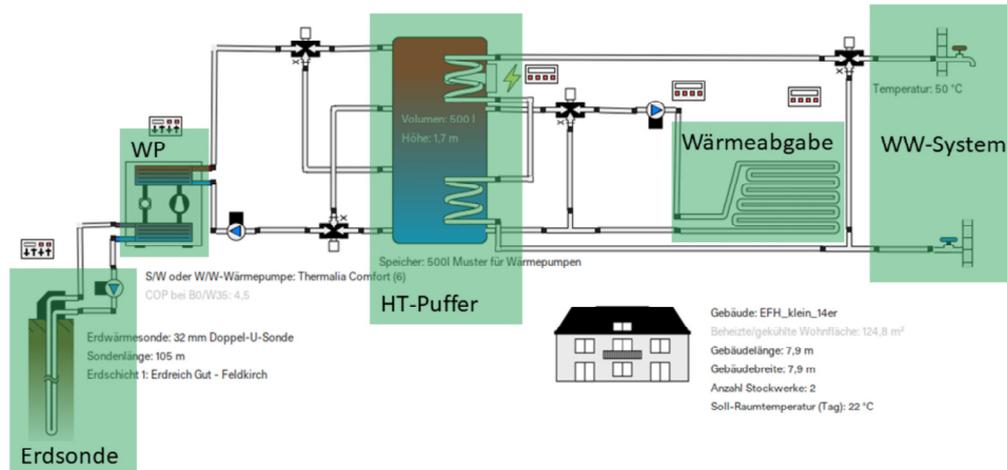
Grundsystem ohne Regeneration



Hier ist das Haustechnikschema des Grundsystems ohne solarthermische Regeneration abgebildet. Das Grundsystem wird zur Ermittlung der möglichen Erdsondenreduktion durch solarthermische Regeneration benötigt.

Haustechnikschemas

Grundsystem ohne Regeneration



Hier ist das Haustechnikschema des Grundsystems ohne solarthermische Regeneration abgebildet. Das Grundsystem wird zur Ermittlung der möglichen Erdsondenreduktion durch solarthermische Regeneration benötigt. Die Bezeichnung HT-Puffer (HT = Hochtemperatur) steht hierbei für die Position des Speichers auf der Heizkreisseite der Wärmepumpe, im Vergleich zum NT-Puffer (NT = Niedertemperatur) auf der Quellseite der Wärmepumpe im Solekreislauf.

Erdsonden ohne Regeneration

EFH klein – 6. Jahr ab Inbetriebnahme

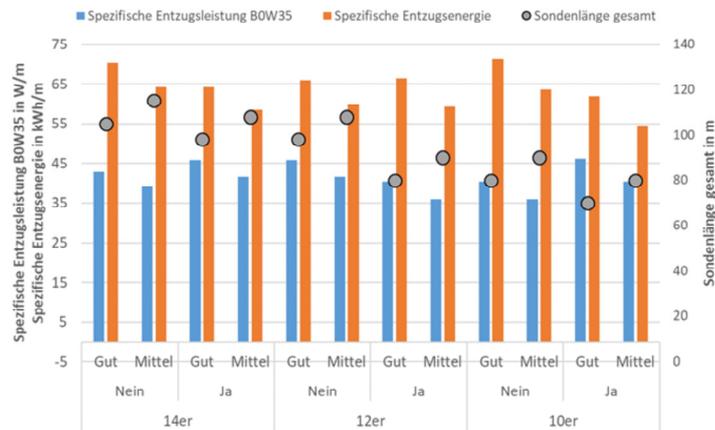
Linie	WRG	Erdreich	Sondenlänge	Spez. Entzugsleistung	Spez. Entzugsenergie	Mittelwert Ein-/Austritt	Strombedarf
-	-	-	m	W/m (B0W35)	kWh/m	°C	kWh
14er	Nein	Gut	1 x 105	42,9	70,4	-1,4	2.427
		Mittel	1 x 115	39,1	64,2	-1,5	2.422
	Ja	Gut	1 x 98	45,9	64,2	-1,4	2.121
		Mittel	1 x 108	41,7	58,4	-1,35	2.118
12er	Nein	Gut	1 x 98	45,9	66,0	-1,35	2.176
		Mittel	1 x 108	41,7	59,9	-1,5	2.171
	Ja	Gut	1 x 80	40,4	66,5	-1,45	1.675
		Mittel	1 x 90	35,9	59,2	-1,35	1.668
10er	Nein	Gut	1 x 80	40,4	71,4	-1,45	1.779
		Mittel	1 x 90	35,9	63,5	-1,4	1.780
	Ja	Gut	1 x 70	46,1	61,9	-1,5	1.414
		Mittel	1 x 80	40,4	54,4	-1,5	1.421

Minimalwert in **Grün**, Maximalwert in **Rot**.

Die benötigte Sondenlänge für die verschiedenen Varianten ohne solarthermische Regeneration ist iterativ ermittelt, so dass die mittlere Temperatur des Wärmeträgermediums im 6. Betriebsjahr -1,5 °C nicht unterschreitet. Zudem ist für jede Variante die spezifische Entzugsleistung und Entzugsenergie, die minimale Mitteltemperatur des Wärmeträgermediums sowie der Strombedarf der Wärmepumpe inklusive Hilfsstrom ausgewertet. Die spezifische Entzugsleistung der einzelnen Varianten des EFH klein liegt zwischen 35,9 und 46,1 W/m für den Betriebspunkt B0W35 der Wärmepumpe (Temperatur des Wärmeträgermediums 0 °C und Heizkreistemperatur 35 °C). Die spezifische Entzugsenergie liegt zwischen 54,4 und 71,4 kWh/m.

Erdsonden ohne Regeneration

EFH klein – 6. Jahr ab Inbetriebnahme



Grafische Darstellung der Werte aus voriger Tabelle.

Erdsonden ohne Regeneration

MFH mittel – 6. Jahr ab Inbetriebnahme

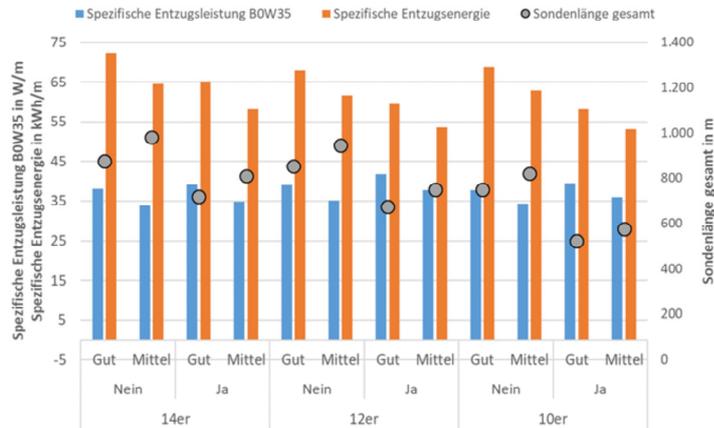
Linie	WRG	Erdreich	Sondenlänge	Spez. Entzugsleistung	Spez. Entzugsenergie	Mittelwert Ein-/Austritt	Strombedarf
-	-	-	m	W/m (B0W35)	kWh/m	°C	kWh
14er	Nein	Gut	7 x 125	37,9	72,3	-1,4	18.369
		Mittel	7 x 140	33,9	64,6	-1,35	18.293
	Ja	Gut	6 x 120	39,2	65,2	-1,45	13.123
		Mittel	6 x 135	34,8	58,1	-1,25	13.061
12er	Nein	Gut	7 x 122	38,9	67,9	-1,4	17.020
		Mittel	7 x 135	35,1	61,5	-1,3	17.006
	Ja	Gut	5 x 135	41,8	59,4	-1,3	11.392
		Mittel	6 x 125	37,6	53,5	-1,35	11.394
10er	Nein	Gut	6 x 125	37,6	68,7	-1,45	14.229
		Mittel	6 x 137	34,3	62,9	-1,4	14.247
	Ja	Gut	5 x 105	39,4	58,2	-1,4	9.512
		Mittel	5 x 115	36,0	53,1	-1,45	9.480

Minimalwert in **Grün**, Maximalwert in **Rot**.

Die benötigte Sondenlänge für die verschiedenen Varianten ohne solarthermische Regeneration ist iterativ ermittelt, so dass die mittlere Temperatur des Wärmeträgermediums im 6. Betriebsjahr -1,5 °C nicht unterschreitet. Zudem ist für jede Variante die spezifische Entzugsleistung und Entzugsenergie, die minimale Mitteltemperatur des Wärmeträgermediums sowie der Strombedarf der Wärmepumpe inklusive Hilfsstrom ausgewertet. Die spezifische Entzugsleistung der einzelnen Varianten des MFH mittel liegt zwischen 33,9 und 41,8 W/m für den Betriebspunkt B0W35 der Wärmepumpe. Die spezifische Entzugsenergie liegt zwischen 53,1 und 72,3 kWh/m.

Erdsonden ohne Regeneration

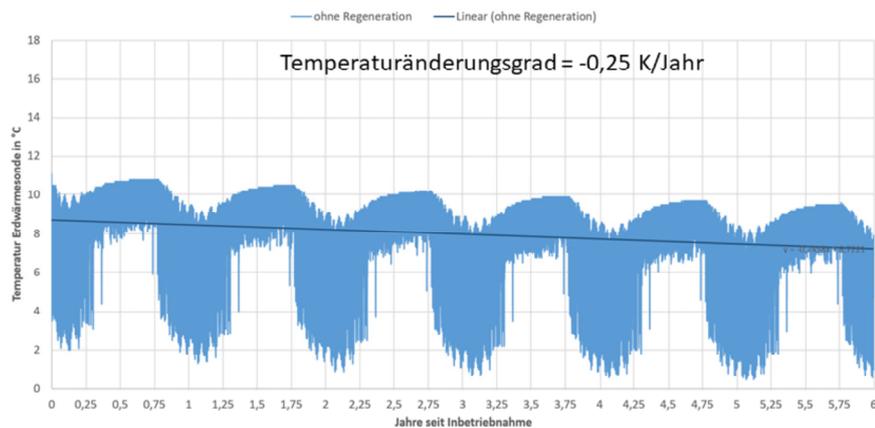
MFH mittel – 6. Jahr ab Inbetriebnahme



Grafische Darstellung der Werte aus voriger Tabelle.

Temperaturverlauf Erdsonde

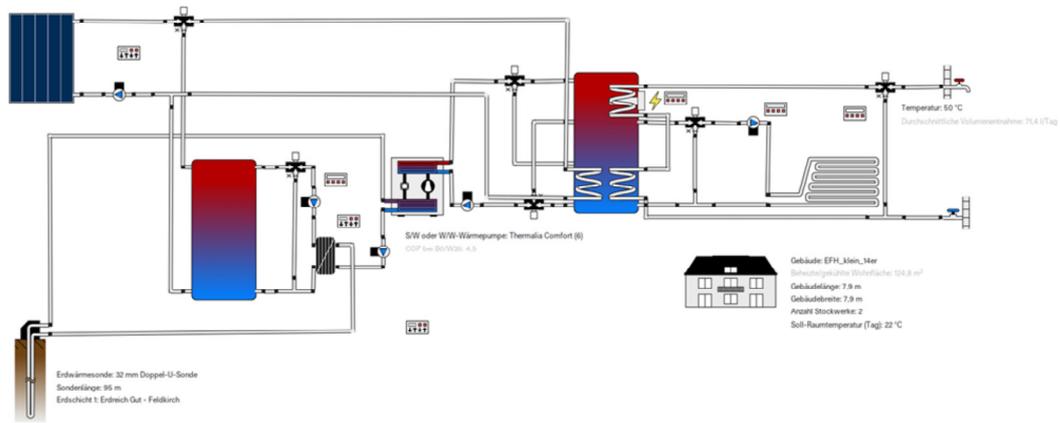
MFH mittel, 14er-Linie, ohne WRG, gutes Erdreich – ohne Regeneration



Das Diagramm zeigt den Temperaturverlauf der Erdwärmesonde für das Grundsystem des mittelgroßen Mehrfamilienhauses mit Hüllqualität nach 14er-Linie und Abluftanlage (ohne WRG) an einem Standort mit gutem Erdreich. Der Temperaturverlauf ist über sechs Betriebsjahre dargestellt und zeigt eindeutig das Sommer- und Winterhalbjahr durch die unterschiedlichen Temperaturen. Ohne solarthermische Regeneration nimmt die mittlere Temperatur der Erdwärmesonde über die sechs Betriebsjahre um 0,25 K/Jahr ab, wie durch die lineare Trendlinie dargestellt.

Haustechnikschemas

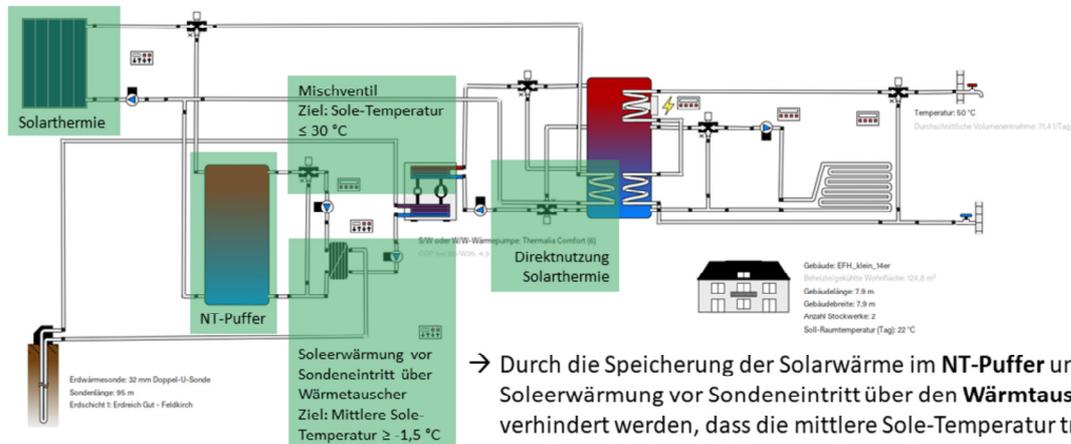
Solarthermische Regeneration



Hier ist das Haustechnikschema des Systems mit solarthermischer Regeneration abgebildet.

Haustechnikschemas

Solarthermische Regeneration



- Durch die Speicherung der Solarwärme im **NT-Puffer** und die Soleerwärmung vor Sondeneintritt über den **Wärmetauscher** kann verhindert werden, dass die mittlere Sole-Temperatur trotz Sondenreduktion $-1,5\text{ °C}$ unterschreitet!
- Durch das **Mischventil** wird sichergestellt, dass die Sole-Temperatur trotz Regeneration 30 °C nicht überschreitet!

Energieinstitut Vorarlberg | © 2021

| 27

Hier ist das Haustechnikschema des Systems mit solarthermischer Regeneration abgebildet. Die solarthermische Energie kann entweder direkt genutzt werden, sofern die Austrittstemperatur höher ist als die Temperatur im HT-Puffer. Ansonsten wird die solarthermische Energie in einem NT-Puffer gespeichert, um das Wärmeträgermedium (Sole) auch in Zeiten ohne Solarertrag vor Sondeneintritt über einen Wärmetauscher zu erwärmen. Damit soll verhindert werden, dass die mittlere Temperatur des Wärmeträgermediums trotz Sondenreduktion den $-1,5\text{ °C}$ -Grenzwert unterschreitet. Mit dem Mischventil wird sichergestellt, dass die Sole-Temperatur während der Regeneration den 30 °C -Grenzwert nicht überschreitet. Sowohl beim Grundsystem als auch beim System mit solarthermischer Regeneration ist ein Temperaturwächter im Modell abgebildet, der die Wärmepumpe kurz vor Erreichen des $-1,5\text{ °C}$ -Grenzwerts für eine Viertelstunde außer Betrieb nimmt.

Solarthermische Regeneration

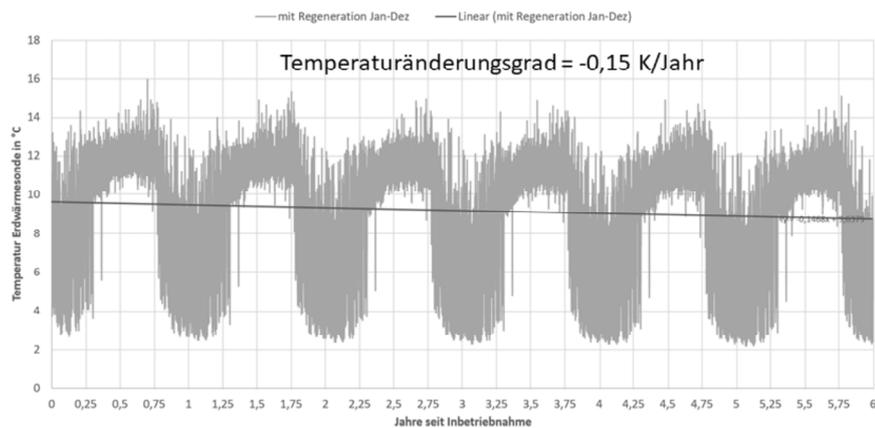
Detailauswertung Temperaturverlauf Erdsonde für MFH mittel, 14er, ohne WRG

- Variante 1 – Regeneration Jan-Dez
 - Solarthermische Regeneration über NT-Puffer: Jänner – Dezember
 - Keine solarthermische Direktnutzung im HT-Puffer
- Variante 2 – Regeneration Jan+Feb+Nov+Dez
 - Solarthermische Regeneration über NT-Puffer: Jänner, Februar, November und Dezember
 - Solarthermische Direktnutzung im HT-Puffer: März – Oktober

In einer Voruntersuchung werden zwei verschiedene Varianten des Systems mit solarthermischer Regeneration untersucht. Bei Variante 1 erfolgt die solarthermische Regeneration über den NT-Puffer ganzjährig und es ist keine solarthermische Direktnutzung im HT-Puffer möglich. Bei Variante 2 erfolgt die solarthermische Regeneration über den NT-Puffer nur in den Kernwintermonaten Jänner, Februar, November und Dezember. In den restlichen Monaten März bis Oktober kann die solarthermische Energie direkt genutzt werden, sofern die Austrittstemperatur höher ist als die Temperatur im HT-Puffer. Die Voruntersuchung erfolgt ohne Sondenreduktion bei den Varianten mit solarthermischer Regeneration.

Temperaturverlauf Erdsonde

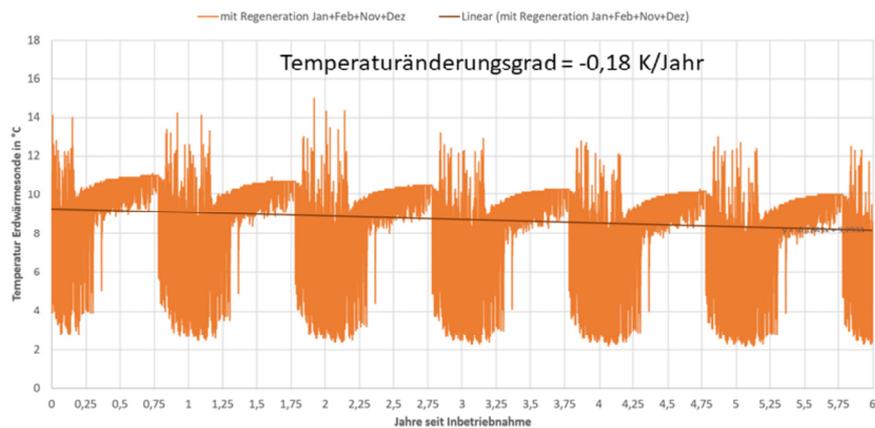
MFH mittel, 14er-Linie, ohne WRG, gutes Erdreich – Regeneration Jan-Dez



Das Diagramm zeigt den Temperaturverlauf der Erdwärmesonde für das System mit solarthermischer Regeneration ganzjährig (Jänner bis Dezember) des mittelgroßen Mehrfamilienhauses mit Hüllqualität nach 14er-Linie und Abluftanlage (ohne WRG) an einem Standort mit gutem Erdreich. Der Temperaturverlauf ist über sechs Betriebsjahre dargestellt und zeigt eindeutig das Sommer- und Winterhalbjahr durch die unterschiedlichen Temperaturen. Ohne solarthermische Regeneration nimmt die mittlere Temperatur der Erdwärmesonde über die sechs Betriebsjahre um 0,15 K/Jahr ab, wie durch die lineare Trendlinie dargestellt.

Temperaturverlauf Erdsonde

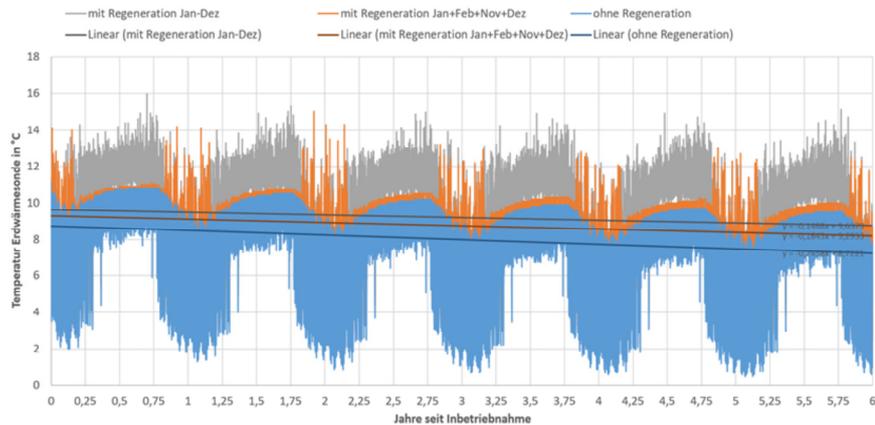
MFH mittel, 14er-Linie, ohne WRG, gutes Erdreich – Regeneration Jan+Feb+Nov+Dez



Das Diagramm zeigt den Temperaturverlauf der Erdwärmesonde für das System mit solarthermischer Regeneration in den Kernwintermonaten (Jänner, Februar, November und Dezember) des mittelgroßen Mehrfamilienhauses mit Hüllqualität nach 14er-Linie und Abluftanlage (ohne WRG) an einem Standort mit gutem Erdreich. Der Temperaturverlauf ist über sechs Betriebsjahre dargestellt und zeigt eindeutig das Sommer- und Winterhalbjahr durch die unterschiedlichen Temperaturen. Ohne solarthermische Regeneration nimmt die mittlere Temperatur der Erdwärmesonde über die sechs Betriebsjahre um 0,18 K/Jahr ab, wie durch die lineare Trendlinie dargestellt.

Temperaturverlauf Erdsonde

MFH mittel, 14er-Linie, ohne WRG, gutes Erdreich



Das Diagramm zeigt den Temperaturverlauf der Erdwärmesonde sowohl für das Grundsystem als auch für die beiden Systeme mit solarthermischer Regeneration (ganzjährig bzw. in den Kernwintermonaten) des mittelgroßen Mehrfamilienhauses mit Hüllqualität nach 14er-Linie und Abluftanlage (ohne WRG) an einem Standort mit gutem Erdreich. Anhand der Temperaturspitzen im Sommer- (nur Regeneration ganzjährig) und Winterhalbjahr lassen sich die verschiedenen Systeme eindeutig unterschieden. Bei den Systemen mit solarthermischer Regeneration erfolgt keine Sondenreduktion.

Solarthermische Regeneration

Detailauswertung Temperaturverlauf Erdsonde für MFH mittel, 14er, ohne WRG

- Grundvariante – ohne Regeneration
 - Strombedarf = 18.369 kWh
 - Mittlere Temperaturänderung Erdreich nach 6 Betriebsjahren = - 1,5 K
 - Mittelwert Ein-/Austrittstemperatur Min = -1,4 °C
- Variante 1 – Regeneration Jan-Dez
 - Strombedarf: 17.916 kWh (-2,5%)
 - Mittlere Temperaturänderung Erdreich nach 6 Betriebsjahren = - 0,9 K
 - Mittelwert Ein-/Austrittstemperatur Min = 0,75 °C
- Variante 2 – Regeneration Jan+Feb+Nov+Dez
 - Strombedarf: 15.884 kWh (-13,5%)
 - Mittlere Temperaturänderung Erdreich nach 6 Betriebsjahren = - 1,1 K
 - Mittelwert Ein-/Austrittstemperatur Min = 0,75 °C
- Fazit: Reine Regeneration (Variante 1) nicht sinnvoll (nur geringe Effizienzverbesserung und Mittelwert Ein-/Austrittstemperatur Min gleich wie Variante 2) → **Weitere Untersuchung erfolgt nach Variante 2!**

Energieinstitut Vorarlberg | © 2021

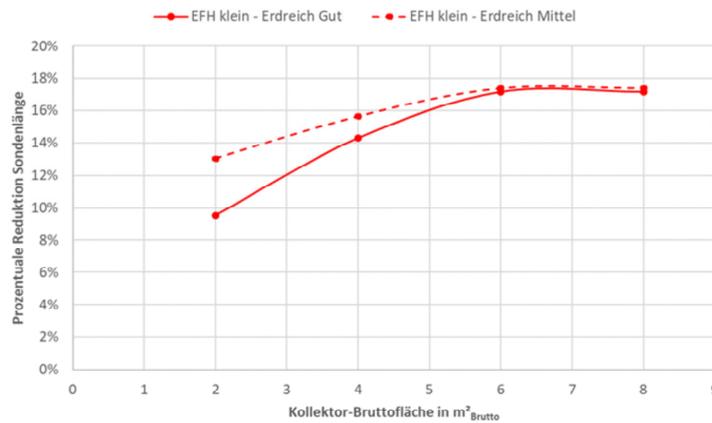
| 32



Das Ergebnis der Voruntersuchung der zwei verschiedene Varianten des Systems mit solarthermischer Regeneration zeigt, dass die ganzjährige Regeneration ohne solarthermische Direktnutzung (Variante 1) nicht sinnvoll ist, da im Vergleich zur Grundvariante ohne Regeneration eine nur geringe Effizienzverbesserung erzielt wird. Das System mit Regeneration in den Kernwintermonaten und solarthermischer Direktnutzung in den restlichen Monaten (Variante 2) erzielt im Vergleich zur Grundvariante eine höhere Effizienzverbesserung aufgrund der Direktnutzung. Im Vergleich zur Variante 1 ist die minimale mittlere Temperatur des Wärmeträgermediums im Betrieb gleich (0,75 °C). Die mittlere Temperaturänderung der Erdwärmesonde nach 6 Betriebsjahren ist bei Variante 2 nur 0,2 K geringer als bei Variante 1. Aus diesen Gründen erfolgt die weitere Untersuchung nach Variante 2. Bei den Systemen mit solarthermischer Regeneration erfolgt keine Sondenreduktion.

Ermittlung Solarthermie-Größe

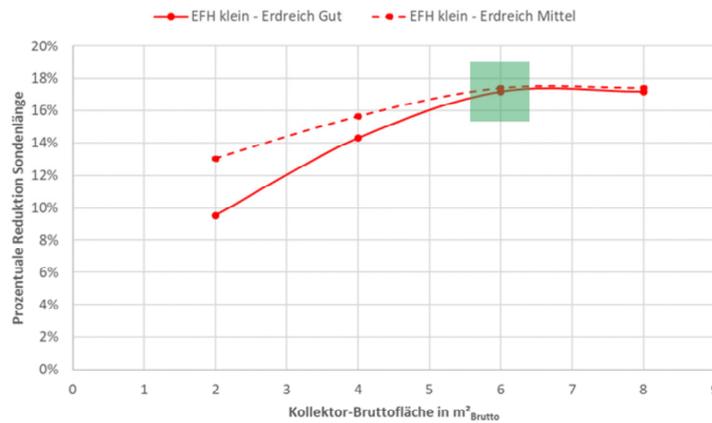
EFH klein, 14er-Linie, ohne WRG – HT-Puffer 500 l und NT-Puffer 300 l



Das Diagramm zeigt die mögliche prozentuale Erdsondenreduktion für verschiedene solarthermische Kollektorgößen für das kleine Einfamilienhaus mit Hüllqualität nach 14er-Linie und Fensterlüftung (ohne WRG) jeweils getrennt für einen Standort mit mittlerem und gutem Erdreich.

Ermittlung Solarthermie-Größe

EFH klein, 14er-Linie, ohne WRG – HT-Puffer 500 l und NT-Puffer 300 l



Das Diagramm zeigt die mögliche prozentuale Erdsondenreduktion (-1,5 °C-Grenzwert eingehalten) für verschiedene solarthermische Kollektorgößen für das kleine Einfamilienhaus mit Hüllqualität nach 14er-Linie und Fensterlüftung (ohne WRG) jeweils getrennt für einen Standort mit mittlerem und gutem Erdreich. Für das kleine Einfamilienhaus wird die Kollektor-Bruttofläche von 6 m²_{Brutto} festgelegt, da eine weitere Vergrößerung keine höhere prozentuale Erdsondenreduktion ermöglicht. Aus Sicht der solarthermischen Direktnutzung ist eine Vergrößerung des Kollektors auf jeden Fall sinnvoll. Das ist jedoch nicht Teil dieser Untersuchung.

Ermittlung Puffervolumen

EFH klein, 14er-Linie, ohne WRG

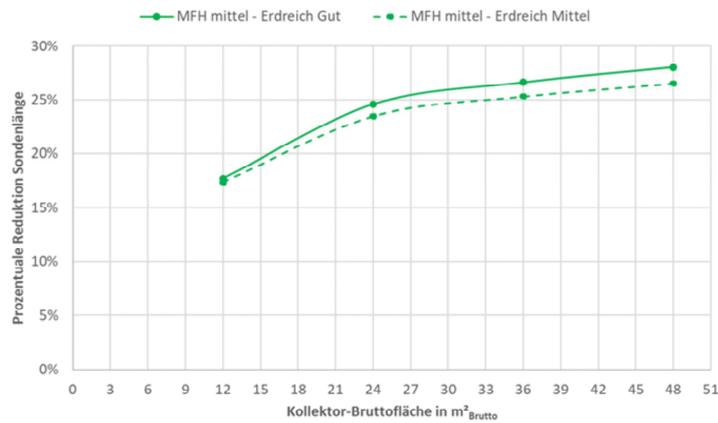
Erdreich	-	„Gut“		„Mittel“	
Solarthermie	m ² _{Brutto}	8			
HT-Puffer	l	500	600	500	600
NT-Puffer	l	300	400	300	400
Strombedarf	kWh	2.096	2.097	2.091	2.095
Prozentuale Reduktion Strombedarf	%	13,6%	13,6%	13,7%	13,5%
Mittelwert Ein-/Austrittstemperatur	°C	-1,43	-1,62	-1,45	-1,7

→ Vergrößerung Puffervolumen (HT und NT) beim EFH klein nicht sinnvoll. **Wird in der weiteren Untersuchung nicht berücksichtigt!**

In einer weiteren Voruntersuchung zeigt, dass eine Vergrößerung des Puffervolumens (HT und NT) beim EFH klein nicht sinnvoll ist und deshalb in der weiteren Untersuchung nicht berücksichtigt wird.

Ermittlung Solarthermie-Größe

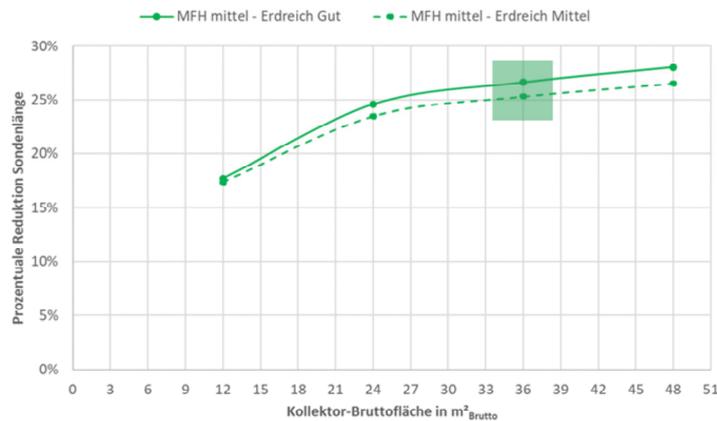
MFH mittel, 14er-Linie, ohne WRG – HT-Puffer 3.000 l und NT-Puffer 1.800 l



Das Diagramm zeigt die mögliche prozentuale Erdsondenreduktion für verschiedene solarthermische Kollektorgrößen für das mittelgroße Mehrfamilienhaus mit Hüllqualität nach 14er-Linie und Abluftanlage (ohne WRG) jeweils getrennt für einen Standort mit mittlerem und gutem Erdreich.

Ermittlung Solarthermie-Größe

MFH mittel, 14er-Linie, ohne WRG – HT-Puffer 3.000 l und NT-Puffer 1.800 l



Das Diagramm zeigt die mögliche prozentuale Erdsondenreduktion für verschiedene solarthermische Kollektorgrößen für das mittelgroße Mehrfamilienhaus mit Hüllqualität nach 14er-Linie und Abluftanlage (ohne WRG) jeweils getrennt für einen Standort mit mittlerem und gutem Erdreich. Für das mittelgroße Mehrfamilienhaus wird die Kollektor-Bruttofläche von 36 m²_{Brutto} festgelegt, da eine weitere Vergrößerung nur eine etwas höhere prozentuale Erdsondenreduktion ermöglicht. Aus Sicht der solarthermischen Direktnutzung ist eine Vergrößerung des Kollektors auf jeden Fall sinnvoll. Das ist jedoch nicht Teil dieser Untersuchung.

Ermittlung Puffervolumen

MFH mittel, 14er-Linie, ohne WRG

Erdreich	-	„Gut“		„Mittel“	
Solarthermie	m ² _{Brutto}	48			
HT-Puffer	l	3.000	3.600	3.000	3.600
NT-Puffer	l	1.800	2.400	1.800	2.400
Strombedarf	kWh	15.719	15.738	15.719	15.760
Prozentuale Reduktion Strombedarf	%	14,4%	14,3%	14,1%	13,8%
Mittelwert Ein-/Austrittstemperatur	°C	-1,5	-1,4	-1,35	-1,4

→ Vergrößerung Puffervolumen (HT und NT) beim MFH mittel bringt nur geringe Verbesserung.
Wird in der weiteren Untersuchung nicht berücksichtigt!

In einer weiteren Voruntersuchung zeigt, dass eine Vergrößerung des Puffervolumens (HT und NT) beim MFH mittel nur eine geringe Verbesserung bringt und deshalb in der weiteren Untersuchung nicht berücksichtigt wird.

Erdsonden mit Regeneration

EFH klein – 6. Jahr ab Inbetriebnahme

Linie	WRG	Erdreich	Sondenlänge	Proz. Reduktion	Spez. Entzugsleistung	Spez. Entzugsenergie	Mittelwert Ein-/Austritt	Strombedarf	Proz. Reduktion
-	-	-	m	%	W/m (B0W35)	kWh/m	°C	kWh	%
14er	Nein	Gut	1 x 87	17,1%	51,7	58,4	-1,46	2.168	10,7%
		Mittel	1 x 95	17,4%	47,4	53,5	-1,5	2.169	10,4%
	Ja	Gut	1 x 83	15,3%	54,2	49,1	-1,39	1.861	12,3%
		Mittel	1 x 92	14,8%	48,9	44,5	-1,35	1.857	12,3%
12er	Nein	Gut	1 x 85	13,3%	52,9	50,2	-1,39	1.915	12%
		Mittel	1 x 94	13%	47,9	45,5	-1,44	1.912	11,9%
	Ja	Gut	1 x 62	22,5%	52,1	49,9	-1,45	1.459	12,9%
		Mittel	1 x 72	20%	44,9	43,4	-1,45	1.452	12,9%
10er	Nein	Gut	1 x 64	20%	50,5	54,1	-1,4	1.566	12%
		Mittel	1 x 71	21,1%	45,5	49,2	-1,4	1.573	11,6%
	Ja	Gut	1 x 60	14,3%	53,8	36,6	-1,35	1.179	16,6%
		Mittel	1 x 65	18,8%	49,7	33,9	-1,45	1.179	17%

Minimalwert in **Grün**, Maximalwert in **Rot**.

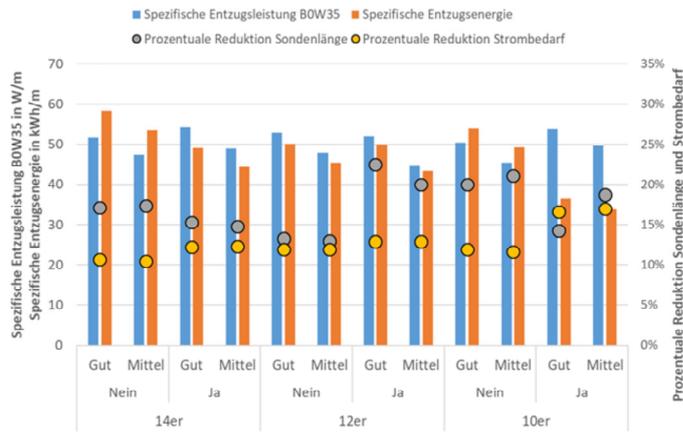
Energieinstitut Vorarlberg | © 2021

| 39

Die benötigte Sondenlänge für die verschiedenen Varianten mit solarthermischer Regeneration ist iterativ ermittelt, so dass die mittlere Temperatur des Wärmeträgermediums im 6. Betriebsjahr -1,5 °C nicht unterschreitet. Zudem ist für jede Variante die prozentuale Erdsondenreduktion zur Grundvariante, die spezifische Entzugsleistung und Entzugsenergie, die minimale Mitteltemperatur des Wärmeträgermediums sowie der Strombedarf der Wärmepumpe inklusive Hilfsstrom und die prozentuale Reduktion des Strombedarfs zur Grundvariante ausgewertet. Die prozentuale Erdsondenreduktion der einzelnen Varianten mit solarthermischer Regeneration des EFH klein liegt zwischen 13% und 22,5%. Die spezifische Entzugsleistung liegt zwischen 44,9 und 54,2 W/m für den Betriebspunkt B0W35 der Wärmepumpe. Die spezifische Entzugsenergie liegt zwischen 33,9 und 58,4 kWh/m. Die prozentuale Reduktion des Strombedarfs liegt zwischen 10,4% und 17%.

Erdsonden mit Regeneration

EFH klein – 6. Jahr ab Inbetriebnahme



Grafische Darstellung der Werte aus voriger Tabelle.

Erdsonden mit Regeneration

MFH mittel – 6. Jahr ab Inbetriebnahme

Linie	WRG	Erdreich	Sondenlänge	Proz. Reduktion	Spez. Entzugsleistung	Spez. Entzugsenergie	Mittelwert Ein-/Austritt	Strombedarf	Proz. Reduktion
-	-	-	m	%	W/m (B0W35)	kWh/m	°C	kWh	%
14er	Nein	Gut	6 x 107	26,6%	51,7	74,9	-1,45	16.253	11,5%
		Mittel	6 x 122	25,3%	45,4	65,7	-1,4	16.261	11,1%
	Ja	Gut	5 x 107	25,7%	52,7	60,3	-1,5	11.246	14,3%
		Mittel	5 x 117	27,8%	48,2	55,2	-1,43	11.230	14%
12er	Nein	Gut	5 x 122	28,6%	54,4	70,7	-1,5	15.011	11,8%
		Mittel	5 x 135	28,6%	49,2	63,5	-1,4	14.908	12,3%
	Ja	Gut	5 x 100	25,9%	56,4	50,3	-1,36	9.488	16,7%
		Mittel	5 x 105	30%	53,7	48,0	-1,5	9.472	16,9%
10er	Nein	Gut	5 x 110	26,7%	51,3	66,6	-1,45	12.304	13,5%
		Mittel	5 x 120	27%	47,0	61,2	-1,39	12.320	13,5%
	Ja	Gut	4 x 100	23,8%	51,8	41,0	-1,35	7.427	21,9%
		Mittel	4 x 107	25,6%	48,4	38,2	-1,45	7.445	21,5%

Minimalwert in **Grün**, Maximalwert in **Rot**.

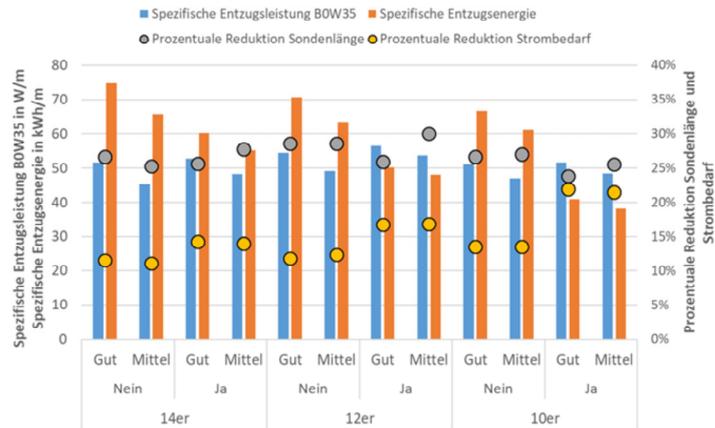
Energieinstitut Vorarlberg | © 2021

| 41

Die benötigte Sondenlänge für die verschiedenen Varianten mit solarthermischer Regeneration ist iterativ ermittelt, so dass die mittlere Temperatur des Wärmeträgermediums im 6. Betriebsjahr -1,5 °C nicht unterschreitet. Zudem ist für jede Variante die prozentuale Erdsondenreduktion zur Grundvariante, die spezifische Entzugsleistung und Entzugsenergie, die minimale Mitteltemperatur des Wärmeträgermediums sowie der Strombedarf der Wärmepumpe inklusive Hilfsstrom und die prozentuale Reduktion des Strombedarfs zur Grundvariante ausgewertet. Die prozentuale Erdsondenreduktion der einzelnen Varianten mit solarthermischer Regeneration des MFH mittel liegt zwischen 23,8% und 30%. Die spezifische Entzugsleistung liegt zwischen 47,0 und 56,4 W/m für den Betriebspunkt B0W35 der Wärmepumpe. Die spezifische Entzugsenergie liegt zwischen 38,2 und 74,9 kWh/m. Die prozentuale Reduktion des Strombedarfs liegt zwischen 11,1% und 21,9%.

Erdsonden mit Regeneration

MFH mittel – 6. Jahr ab Inbetriebnahme



Grafische Darstellung der Werte aus voriger Tabelle.

Variantsimulation

Zusammenfassung

- EFH klein
 - Prozentuale Reduktion Sondenlänge: 13 - 22,5% (Mittelwert 17,3%)
 - Prozentuale Reduktion Strombedarf: 10,4 – 17% (Mittelwert 12,7%)
- MFH mittel
 - Prozentuale Reduktion Sondenlänge: 23,8 - 30% (Mittelwert 26,8%)
 - Prozentuale Reduktion Strombedarf: 11,1 – 21,9% (Mittelwert 14,9%)

Im direkten Vergleich zeigt sich, dass beim mittelgroßen Mehrfamilienhaus eine wesentlich höhere prozentuale Sondenreduktion möglich ist als beim kleinen Einfamilienhaus. Die prozentuale Reduktion des Strombedarfs im Vergleich zur Grundvariante ohne solarthermische Regeneration fällt beim mittelgroßen Mehrfamilienhaus ebenfalls höher aus.

Wirtschaftlichkeit

Kostenschätzung – Brutto, 2020

- Auf Basis Kostenanalyse Heizsysteme 2015
- Mit Baupreisindex angepasst
 - 2015: 146,2
 - 2020: 165,2
- Erdsonden: $61,2 \text{ €/m} \times \text{Sondenlänge} + 3.616 \text{ €}$
- Solarkollektor: $464 \text{ €/ m}^2_{\text{Brutto}} \times \text{Bruttofläche} + 2.327 \text{ €}$
- NT-Pufferspeicher: $1,5 \text{ €/l} \times \text{Puffervolumen} + 1.966 \text{ €}$

Die Kostenschätzung für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgt auf Basis des Projekts Kostenanalyse Heizsysteme aus dem Jahr 2015. Die damals ermittelten Kostenfunktionen für Erdsonden, Solarkollektoren und Pufferspeicher sind mit dem Baupreisindex auf das Jahr 2020 angepasst. Die angegebenen Kosten sind Bruttobeträge.

Wirtschaftlichkeit

Kostenschätzung – EFH klein

Linie	WRG	Erdreich	Erdsonden	Solarkollektor	NT-Pufferspeicher	Bilanz
-	-	-	€	€	€	€
14er	Nein	Gut	-1.101	5.109	2.414	6.422
		Mittel	-1.223	5.109	2.414	6.300
	Ja	Gut	-917	5.109	2.414	6.606
		Mittel	-978	5.109	2.414	6.544
12er	Nein	Gut	-795	5.109	2.414	6.728
		Mittel	-856	5.109	2.414	6.667
	Ja	Gut	-1.101	5.109	2.414	6.422
		Mittel	-1.101	5.109	2.414	6.422
10er	Nein	Gut	-978	5.109	2.414	6.544
		Mittel	-1.162	5.109	2.414	6.361
	Ja	Gut	-612	5.109	2.414	6.911
		Mittel	-917	5.109	2.414	6.606

Negative Werte sind Kosteneinsparungen. Bruttobeträge für 2020. Minimalwert in **Grün**, Maximalwert in **Rot**.

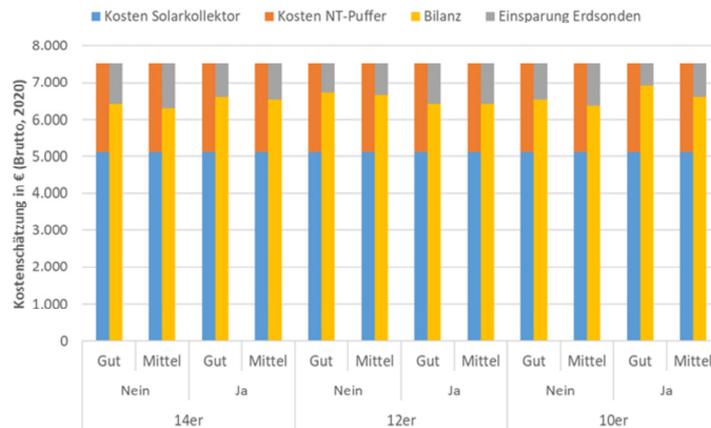
Energieinstitut Vorarlberg | © 2021

| 45

In dieser Tabelle sind die geschätzten Kosten für die Erdsonden, den Solarkollektor und NT-Pufferspeicher der verschiedenen Varianten des kleinen Einfamilienhauses angegeben. Bei den Erdsonden ist die Kosteneinsparung im Vergleich zur Variante ohne solarthermische Regeneration angegeben. Die Kosteneinsparung liegt zwischen 612 und 1.223 €. Die resultierenden Gesamtkosten liegen zwischen 6.300 und 6.911 €. Die angegebenen Kosten sind Bruttobeträge.

Wirtschaftlichkeit

Kostenschätzung – EFH klein



Grafische Darstellung der Werte aus voriger Tabelle.

Wirtschaftlichkeit

Kostenschätzung – MFH mittel

Linie	WRG	Erdreich	Erdsonden	Solarkollektor	NT-Pufferspeicher	Bilanz
-	-	-	€	€	€	€
14er	Nein	Gut	-14.249	19.021	4.651	9.423
		Mittel	-15.166	19.021	4.651	8.506
	Ja	Gut	-11.313	19.021	4.651	12.359
		Mittel	-13.760	19.021	4.651	9.913
12er	Nein	Gut	-14.921	19.021	4.651	8.751
		Mittel	-16.511	19.021	4.651	7.161
	Ja	Gut	-10.702	19.021	4.651	12.970
		Mittel	-13.760	19.021	4.651	9.913
10er	Nein	Gut	-12.231	19.021	4.651	11.442
		Mittel	-13.576	19.021	4.651	10.096
	Ja	Gut	-7.644	19.021	4.651	16.028
		Mittel	-8.990	19.021	4.651	14.683

Negative Werte sind Kosteneinsparungen. Bruttobeträge für 2020. Minimalwert in **Grün**, Maximalwert in **Rot**.

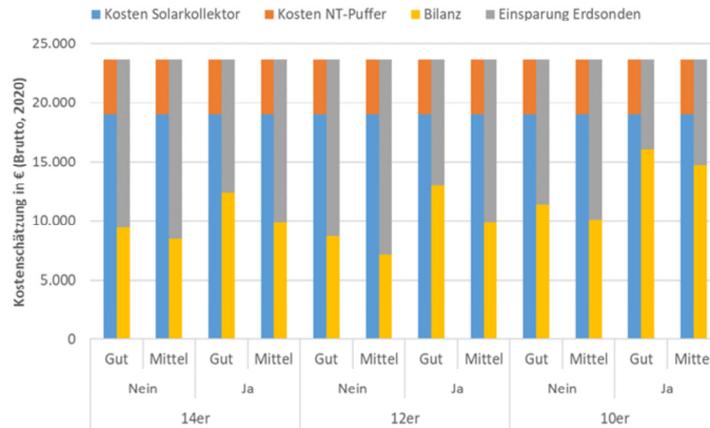
Energieinstitut Vorarlberg | © 2021

| 47

In dieser Tabelle sind die geschätzten Kosten für die Erdsonden, den Solarkollektor und NT-Pufferspeicher der verschiedenen Varianten des mittelgroßen Mehrfamilienhauses angegeben. Bei den Erdsonden ist die Kosteneinsparung im Vergleich zur Variante ohne solarthermische Regeneration angegeben. Die Kosteneinsparung liegt zwischen 7.644 und 16.511 €. Die resultierenden Gesamtkosten liegen zwischen 7.161 und 16.028 €. Die angegebenen Kosten sind Bruttobeträge.

Wirtschaftlichkeit

Kostenschätzung – MFH mittel



Grafische Darstellung der Werte aus voriger Tabelle.

Wirtschaftlichkeit

Statische Amortisation – EFH klein

Linie	WRG	Erdreich	Bilanz	Einsparung Betrieb	Statische Amortisation
-	-	-	€	€/a	a
14er	Nein	Gut	6.422	34	186
		Mittel	6.300	34	187
	Ja	Gut	6.606	35	191
		Mittel	6.544	35	188
12er	Nein	Gut	6.728	35	194
		Mittel	6.667	34	193
	Ja	Gut	6.422	29	223
		Mittel	6.422	29	223
10er	Nein	Gut	6.544	28	231
		Mittel	6.361	28	231
	Ja	Gut	6.911	31	221
		Mittel	6.606	32	205

Einsparung Betrieb mit Wärmestrom VKW (13,32 ct/kWh) ermittelt. Bruttobeträge für 2020.

Minimalwert in **Grün**, Maximalwert in **Rot**.

Energieinstitut Vorarlberg | © 2021

| 49



Energieinstitut Vorarlberg

Zur vereinfachten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird die statische Amortisation aus den resultierenden Gesamtkosten und der Einsparung im Betrieb ermittelt. Die Einsparung im Betrieb ergibt sich aus der Strombedarfsreduktion im Vergleich zur Grundvariante ohne solarthermische Regeneration und einem Strompreis von 13,32 ct/kWh. Die statische Amortisation liegt beim EFH klein zwischen 186 und 231 Jahren. Die angegebenen Kosten sind Bruttobeträge.

Wirtschaftlichkeit

Statische Amortisation – MFH mittel

Linie	WRG	Erdreich	Bilanz	Einsparung Betrieb	Statische Amortisation
-	-	-	€	€/a	a
14er	Nein	Gut	9.423	282	33
		Mittel	8.506	271	31
	Ja	Gut	12.359	250	49
		Mittel	9.913	244	41
12er	Nein	Gut	8.751	268	33
		Mittel	7.161	279	26
	Ja	Gut	12.970	254	51
		Mittel	9.913	256	39
10er	Nein	Gut	11.442	256	45
		Mittel	10.096	257	39
	Ja	Gut	16.028	278	58
		Mittel	14.683	271	54

Einsparung Betrieb mit Wärmestrom VKW (13,32 ct/kWh) ermittelt. Bruttobeträge für 2020.

Minimalwert in **Grün**, Maximalwert in **Rot**.

Energieinstitut Vorarlberg | © 2021

| 50



Energieinstitut Vorarlberg

Zur vereinfachten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird die statische Amortisation aus den resultierenden Gesamtkosten und der Einsparung im Betrieb ermittelt. Die Einsparung im Betrieb ergibt sich aus der Strombedarfsreduktion im Vergleich zur Grundvariante ohne solarthermische Regeneration und einem Strompreis von 13,32 ct/kWh. Die statische Amortisation liegt beim MFH mittel zwischen 26 und 58 Jahren. Die angegebenen Kosten sind Bruttobeträge.

Fazit

Reduktion Erdsondenlänge durch solarthermische Regeneration

- -1,5 °C-Grenzwert kann nur mit NT-Pufferspeicher jederzeit eingehalten werden!
- Beim MFH mittel besser realisierbar!
 - Höhere prozentuale Reduktion der Erdsondenlänge: 26,8 % (Mittelwert MFH mittel) zu 17,3% (Mittelwert EFH klein)
 - Höhere Wirtschaftlichkeit (statische Amortisation): 40 a (Mittelwert MFH mittel) zu 206 a (Mittelwert EFH klein)
- Keine Empfehlung, da Systemsicherheit (Einfrieren Erdsonden) nur bei korrektem Betrieb der solarthermischen Anlage gewährleistet ist!

Abschließend lässt sich sagen, dass eine Erdsondenreduktion durch solarthermische Regeneration nur mit einem NT-Pufferspeicher realisieren lässt, um den -1,5 °C-Grenzwert jederzeit einzuhalten. Das System lässt sich beim mittelgroßen Mehrfamilienhaus besser realisieren als beim kleinen Einfamilienhaus, da eine höhere prozentuale Erdsondenreduktion erzielt werden kann und somit auch eine höhere Wirtschaftlichkeit. Dennoch wird das System nicht empfohlen, da die Systemsicherheit (Vermeidung des Einfrierens der Erdsonden) nur bei korrektem Betrieb der solarthermischen Anlage gewährleistet ist.