

# Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

**Programmsteuerung:**

Klima- und Energiefonds

**Programmabwicklung:**

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

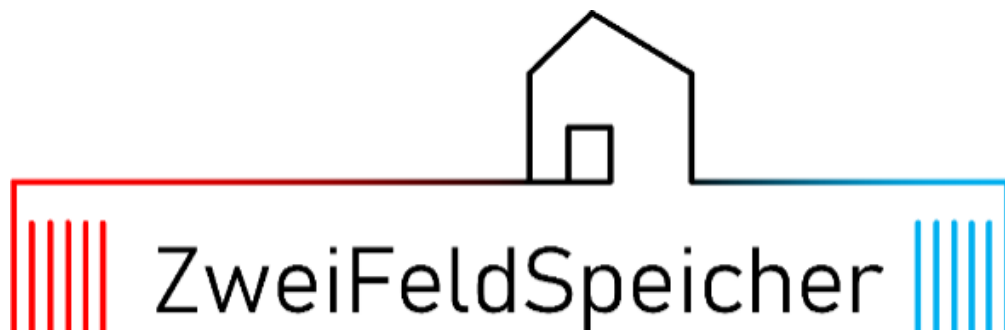
Endbericht

erstellt am

25.03.2023

## Projekttitle: Zweifeldspeicher

Projektnummer: 39998635



Ausschreibung	07. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	15/11/2021
Projektende	14/11/2022
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	12 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	GeoSphere Austria (ehemals Geologische Bundesanstalt), Austrian Institute of Technology GmbH, ENFOS e.U., Technische Universität Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik
AnsprechpartnerIn	Mag. Stefan Hoyer - Geologische Bundesanstalt
Postadresse	Neulinggasse 38
Telefon	+43 1 7125674 - 6335
Fax	+43 1 3691233
E-mail	<a href="mailto:stefan.hoyer@geosphere.at">stefan.hoyer@geosphere.at</a> <a href="mailto:kontakt@geosphere.at">kontakt@geosphere.at</a>
Website	<a href="http://www.geosphere.at">www.geosphere.at</a>

AutorInnen:

Mag. Stefan Hoyer  
Mag. Martin Fuchsluger  
Cornelia Steiner MSc.  
Doris Rupprecht MSc.  
Eszter Nyéki, MSc.

GeoSphere Austria



DI Dr. Edith Haslinger  
DI Dr. Michael Lauer mann

Austrian Institute for Technology



Dipl.-Ing. Dr. techn.  
Peter Biermayr

Energie und Forst – Forschung und  
Service

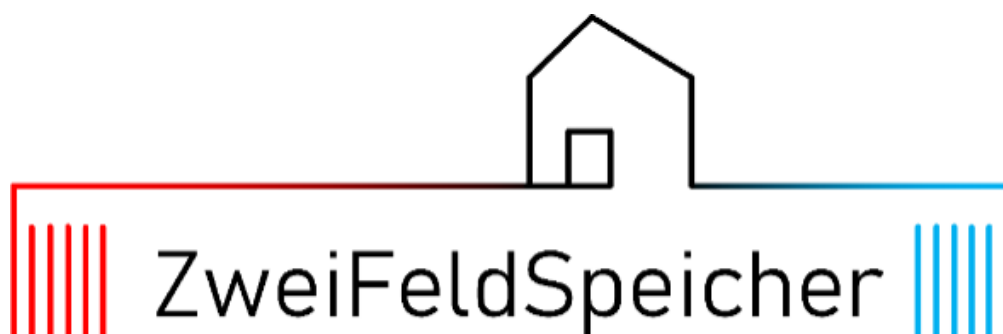


Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing.  
Dr.techn.  
Karl Ponweiser  
Dipl.-Ing. Viktoria Illyes  
Dipl.-Ing. Florian Heindl  
Stephan Hirschler

Technische Universität Wien  
Institut für Energietechnik und  
Thermodynamik



INSTITUT FÜR  
ENERGIETECHNIK UND  
THERMODYNAMIK  
Institute for Energy Systems and Thermodynamics



# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Systemdefinition und Randbedingungen .....	3
2.1	Systemdefinition Übersicht .....	3
2.2	Bedarfsprofile für Heizen, Kühlen und Brauchwasser .....	7
2.3	Modell der saisonalen Wärmequelle .....	10
2.4	Hydraulik: abgeschätzte Druckverluste, Volumenströme und Pumpenauswahl .....	12
2.5	Modell der Wärmepumpe .....	13
2.6	Modell der Pufferspeicher .....	15
2.7	Modell der Erdsondenspeicher .....	16
3	Rechtliche und technische Rahmenbedingungen für Erdwärmesonden .....	21
3.1	Zur Definition des Stands der Technik .....	22
3.2	Einreichverfahren .....	22
3.3	Stand der Technik .....	25
3.4	Auflagen .....	25
3.5	Spezielle technische Parameter .....	25
3.6	Limitierung der Tiefe .....	29
3.7	Weiterführende Literatur und Links .....	29
4	Gesamtsimulation, Dimensionierung und Szenarienmodellierung .....	30
4.1	Dimensionierungen .....	30
4.2	Funktionsweise der Gesamtsimulation .....	33
4.3	Szenarienmodellierung .....	35
5	Wirtschaftlichkeit .....	44
5.1	Betriebswirtschaftliche Systemdefinition .....	44
5.2	Kostenstruktur .....	44
5.3	Wirtschaftlichkeitsmodell .....	47
5.4	Betriebswirtschaftliche Variantenrechnung .....	48
6	Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....	53
7	Ausblick und Empfehlungen .....	56
8	Literaturverzeichnis .....	57
9	Kontaktdaten .....	57
10	Anhang 1 .....	58

## 1 Einleitung

Der Nutzung oberflächennaher geothermischer Anwendungen (darunter wird die Nutzung der Erdwärme bis zu einer Tiefe von 300 m verstanden) im Sinne eines saisonalen Speichers als Herzstück eines Wärme- und Kältenetzes unter Einbeziehung unkonventioneller Wärmequellen und –senken wird für die Dekarbonisierung der Wärme- und Kälteversorgung große Bedeutung beigemessen. Dabei zeichnet sich die Erdwärmennutzung unter anderem durch die thermische Trägheit des Untergrunds aus. Dadurch kann eine saisonale Anwendung mit Kühl- und Wärmeanwendung immer auch als thermischer Speicher verstanden werden. Diese saisonale Nutzung von Erdwärmesondenfeldern zur ganzjährigen Beheizung und Kühlung von Räumen wird heute bereits in zahlreichen Fällen betrieben und kann als Stand der Technik betrachtet werden. Dabei wird dem Untergrund im Winter Energie entzogen und in etwa demselben Maße im Sommer wieder zugeführt. Das mittlere Temperaturniveau im Untergrund schwankt dabei saisonal zwischen etwa 5 °C und 20 °C, weist aber bei ausbalanzierter Betriebsweise über die Jahre keinen nennenswerten Trend auf.

In mehreren Vorprojekten wurden Erdwärmespeicher bereits behandelt (Degent-NET, SANBA, Heat Harvest). Diese Projekte waren jedoch entweder stark auf die Optimierung des Wärmenetzes fokussiert (Degent-NET, SANBA), wobei der Erdwärmespeicher als Komponente zum Lastausgleich bzw. zur Lastverschiebung, oder als reiner Heizenergiespeicher (Heat Harvest) betrachtet wurde. Die generelle Innovation im "Zweifeldspeicher"-Ansatz liegt darin, das Gesamtsystem ausgehend vom Speicher und dessen optimierter Betriebsweise als zentrales Element zu betrachten.

Übergeordnetes Ziel des Projektes ZWEIFELDSPEICHER war es, zu untersuchen, ob die Teilung des Erdsondenspeichers in zwei getrennte Felder zur Wärme- und Kälteversorgung eines Gebäudequartiers mittels Wärmepumpe und Erdsondenspeicher Vorteile bringt. Die Idee dabei ist, die Felder auf unterschiedlichen Temperaturniveaus zu betreiben, sodass aus dem kälteren Feld freie Kühlung möglich ist, und das wärmere Feld zeitgleich auf höherem Temperaturniveau zum Beispiel durch Solarthermie regeneriert werden kann. Auf der Bedarfsseite wurde ein für Mitteleuropa repräsentatives Gebäudebedarfsprofil eines gemischten Wohnquartiers mit überwiegendem Wärmebedarf ausgewählt, siehe Kapitel 2.2 bzw. Abbildung 4. Für den Vergleich des EINFELDSPEICHERS mit einem ZWEIFELDSPEICHER wurde ein Tool in Python „PYG“ entwickelt, siehe Kapitel 2.7. Mit diesem Tool werden zuerst die Wärmepumpen und Pufferspeicher auf den Gebäudebedarf ausgelegt. Danach kann die Dimension der saisonalen Wärmequelle (Solarmodul) unter Einhaltung der Dimensionierungsziele (Kapitel 2.7.5) iterativ ermittelt werden, welche auch von der Priorisierung der solar erzeugten Wärme abhängig ist. Die Priorität der Solarenergie kann im Vorfeld auf maximale Energieausbeute (zuerst Regeneration der Sonden 15-30 °C) oder auf maximale Temperatur (prioritär Beladung des Warmwasserspeichers mit 35 °C) eingestellt werden. Für den Betrieb eines Zweifeldspeichers muss eine Regelung implementiert werden, die steuert aus welchem der beiden Felder entnommen bzw. regeneriert wird. In der Praxis wird dies voraussichtlich durch Messung der aktuellen Vor- und Rücklauftemperatur oder, in einer fortgeschrittenen Variante, durch modellprädiktive Regelung erfolgen. Die Gesamtsimulation berücksichtigt die stündlichen Leistungen aller Komponenten und regelt diese unter Einhaltung des Energieerhaltungssatzes.

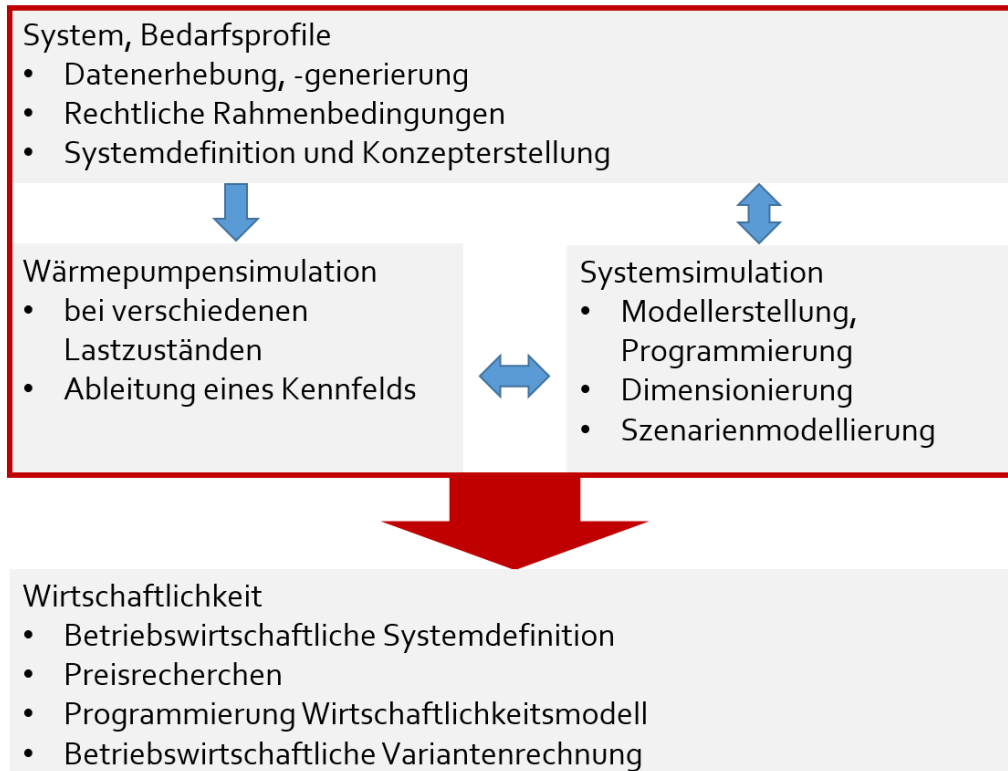
Das Projektkonsortium erwartet durch die Trennung eines einzelnen Erdwärmespeichers in einen "warmen" und einen "kalten" Speicher einerseits Effizienzgewinne sowohl im Heiz- wie auch im Kühlbetrieb. Andererseits können durch die Trennung auch weitere günstige Wärmequellen ("low hanging fruit") erschlossen werden. Diese sind zum Beispiel Solarthermie- und Asphaltkollektoren oder Luftwärmetauscher, sowie Abwärme aus Gewerbe und Industrie. Wird der Heiz- und Kühlenergiebedarf hingegen nur aus einem Speicherfeld bedient, so wirkt sich eine zusätzliche Wärmequelle im Sommer negativ auf die Kühleffizienz aus.

Schlussendlich wurde mit den Berechnungsergebnissen eine betriebswirtschaftliche Systemanalyse des Zweifeldspeicherkonzepts auf der Grundlage der Kapitalwertmethode durchgeführt.

Das Projekt Zweifeldspeicher wurde als einjähriges Sondierungsprojekt im Rahmen der 7. Ausschreibung des Energieforschungsprogramms des Klima- und Energiefonds durchgeführt und ist dem Ausschreibungsschwerpunkt **3.3 Thermische Speicher** zuzurechnen.

Weitere Schwerpunkte, die mit dieser Sondierung gestreift werden, sind:

- **1.3 Sektorkopplung** und **2.1 Energieeffizienz** in der Industrie durch das Einbindungspotential unkonventioneller Wärmequellen und –senken auf bisher wenig genutztem Temperaturniveau
- Die Sondierung legt den Grundstein für die Erarbeitung einer komplexen Regelstrategie zur Optimierung des Gesamtkonzepts in einem Folgeprojekt und trägt so auch zu **4.1 Automatisierung und Energiemanagement** bei.



## 2 Systemdefinition und Randbedingungen

Um entsprechend der Zielsetzung des Projektes den Performancevergleich zwischen einem Einfeldspeicher- und einem Zweifeldspeicher-System durchführen zu können, müssen die beiden Systeme definiert und die von außen vorgegebenen Randbedingungen modelliert bzw. erhoben (siehe Kapitel 3) werden. Randbedingungen, welche vom Systembetreiber gewählt werden können, sind in Kapitel 4 beschrieben.

### 2.1 Systemdefinition Übersicht

Bei der Definition des Systems ist es notwendig, die Systeme einerseits möglichst einfach zu gestalten, aber andererseits alle Komponenten, die zur Funktion der Systeme notwendig sind, abzubilden. Es wurden folgende Komponenten vorgesehen: a) Saisonaler, thermischer Energiespeicher in Form eines Erdsondenspeichers auf Niedrigsttemperaturniveau, b) Wärmepumpen zur Erhöhung des Temperaturniveaus zum Heizen und zur Brauchwassererwärmung bzw. zur Erniedrigung des Temperaturniveaus zum Kühlen, c) Kurzzeit-Pufferspeicher (Schichtspeicher) zur Abfederung von Bedarfsspitzen, d) Solarthermie-Kollektoren zur Bereitstellung von thermischer Energie, und e) einem verbindenden Rohrleitungsnetz.

Beim Zweifeldspeichersystem, wie in Abbildung 2 dargestellt, ist der Erdsondenspeicher in zwei Sondenfelder aufgeteilt. Das Einfeldspeichersystem, wie in Abbildung 3 dargestellt, weist nur einen Erdsondenspeicher auf. In den Abbildungen ist jeweils die Systemgrenze der Untersuchung eingezeichnet. Die Gebäudeseite, repräsentiert durch Kühlbedarf, Heizbedarf und Bedarf an Energie für die Warmwasserbereitung, ist in beiden Varianten gleich und daher außerhalb der Systemgrenze. Für die simulatorische Untersuchung des Energieversorgungs- und -verteilsystems wird der stündliche Bedarf an Kühlenergie (CL Demand) sowie der stündliche Bedarf an Energie zum Heizen (HT Demand) und zur Warmwasserbereitung (DHW Demand) in Form von Bedarfsprofilen als Randbedingung eingebunden. Informationen zur Erstellung der Bedarfsprofile sind in Kapitel 2.2 zu finden. Als Wärmequelle wurde eine thermische Solaranlage ausgewählt, deren stündliches Dargebot in Abhängigkeit der aktuellen Systemtemperatur ebenfalls als Randbedingung vorgegeben ist. Die elektrische Energie für den Betrieb der hydraulischen Pumpen und der Wärmepumpen kann uneingeschränkt aus dem elektrischen Netz bezogen werden.

Die Booster-Wärmepumpe (Booster\_HP), sowie der Speicher für die Warmwasserversorgung (DHWBUF) wurden in das System aufgenommen, da die Energie für die Warmwasserversorgung sowohl von der Booster-Wärmepumpe als auch direkt von der Solaranlage geliefert werden kann und daher die Größe der Solaranlage und die Betriebsstrategie Einfluss auf diese beiden Komponenten haben. Die Gebäudeseite wird als hydraulisch vom System der Energiebereitstellung und -verteilung getrennt modelliert, wie durch die Wärmetauscher zu erkennen ist. Das Solarfeld ist vom System der Energieverteilung ebenfalls hydraulisch getrennt. Des Weiteren wurde eine hydraulische Trennung zwischen der kalten Seite der Wärmepumpe (inklusive der Erdsondenspeicher und deren vorgelagerter Pufferspeicher) und der heißen Seite des Energieverteilsystems vorgesehen.

Die erforderliche Größe der Systemkomponenten und deren stündlicher Einsatzverlauf für verschiedene Szenarien sind Ergebnis der Simulation und keine Randbedingungen, siehe *Kapitel 4* und *6*.

Die Systemdefinition ist in Tabelle 1 angegeben, die verwendeten Abkürzungen sind in Tabelle 2 erklärt.

**Tabelle 1. Systemdefinition.**

Ort		Österreich; in die Erstellung der Bedarfsprofile sind Wetterdaten aus Baden bei Wien eingeflossen.
	max. Beladungstemperatur Feld	30 °C Vorlauftemperatur, für mehr Informationen siehe Kapitel 3.1.4 <i>Rechtliche Rahmenbedingungen</i>
	Grundwasser	Keines.
	Platz für 2 Felder	Baugrund ist verfügbar.
Erdsondenspeicher	räuml. Abstand kalt/warm	20 m, ohne Einfluss
	Bohrtiefe	150 m
	Sondenabstand	Ergebnis des Projekts.
	min. Vorlauftemperatur	-3 °C (Arbeitsmedium mit Frostschutz)
	max. Vorlauftemperatur	30 °C, siehe unten
	Sondentyp	Doppel-U, DN32
	Ungestörte Erdreichtemperatur	13,3 °C
Wärmeübertragerfluid	Wasser/Ethanol 20 Vol. %	
Spitzenlastabdeckung	Die Bedarfsprofile stellen bereits eine optimierte Heiz- bzw. Kühlregelung dar und weisen nur mehr moderate Spitzen auf. Die geforderten Leistungen müssen also geliefert werden.	
Bilanzausgleich	Der Bilanzausgleich ist ein Ergebnis aus der Simulation; die Felder werden vom Ursprungszustand über mehrere Jahre in ihren Sollzustand gebracht. Dann sollten sie ausgeglichen bilanziert betrieben werden.	
zusätzliche Wärmequelle	Solarthermie-Kollektoren; notwendig zum Bilanzausgleich, da der Wärmebedarf den Kältebedarf übersteigt. Wärmeübertragerfluid = Wasser-Glykol-Gemisch (30 % Glykol)	
zusätzliche Wärmesenke	Keine.	

Die Funktionalität des Systems gestaltet sich folgendermaßen, siehe Abbildung 2:

Der Kühlbedarf kann aus dem kalten Erdsondenfeld über freie Kühlung, das bedeutet ohne die Notwendigkeit des Einsatzes einer Kältemaschine (Free Cooling), im Zuge des thermischen Beladeprozesses des kalten Erdsondenfeldes solange gedeckt werden, bis die Rücklauftemperatur aus dem Erdsondenfeld derart angestiegen ist, dass eine unmittelbare Gebäudekühlung nicht mehr möglich ist. Ist diese Temperatur überschritten, muss eine Wärmepumpe betrieben werden, die dann niedertemperaturseitig (quellenseitig) die Temperatur soweit absenkt, dass wieder Gebäudekühlung, nun erzwungene Kühlung (Forced Cooling), möglich ist. Hochtemperaturseitig (senkenseitig) beliefert diese Wärmepumpe je nach Möglichkeit vorrangig den Heiz-Pufferspeicher (HTBUF) oder das warme



Erdsondenfeld. Die Speicher ANBUF\_c und ANBUF\_w sind als hydraulische Weichen zu verstehen und besitzen eine vernachlässigbare Speicherkapazität.

Der Heizbedarf wird immer über den Heiz-Pufferspeicher gedeckt. Dieser kann über viele Wege befüllt werden: Die Solarthermie-Kollektoren können in diesen Speicher einspeisen. Neben dieser äußeren, temperaturabhängigen Quelle kann der Heiz-Pufferspeicher mittels der Wärmepumpen befüllt werden. Je nach der Höhe des Bedarfs werden eine oder mehrere Wärmepumpen betrieben. Quellenseitig können die Wärmepumpen vom Kühlbedarf (wie oben beschrieben), aus dem kalten Erdsondenfeld, aus dem warmen Erdsondenfeld oder von der Solarthermie gespeist werden.

Der Energiebedarf zur Brauchwassererwärmung kann, falls möglich, direkt durch die Solarthermie gedeckt werden. Ansonsten entnimmt die Booster-Wärmepumpe quellenseitig Energie aus dem Heiz-Pufferspeicher und liefert sie beim erforderlichen Temperaturniveau in den Brauchwasser-Heizungsspeicher (DHWBUF).

Die Solarthermie kann auf unterschiedliche Weise betrieben werden: Üblicherweise wird versucht, ein möglichst hohes Temperaturniveau und damit eine hohe Exergieausbeute zu erreichen. Andererseits kann der Fokus auch auf die Bilanzierung des Sondenfelds gelegt werden: Je geringer das Temperaturniveau der Solarthermie, desto höher ist die energetische Ausbeute. Somit kann die thermische Bilanz mit vergleichsweise kleiner Fläche ausgeglichen werden (sh. Kapitel 4).

Weiters ist es beim Zweifeldspeicherkonzept möglich, wenn am Strommarkt günstige Strompreise herrschen, mittels der Wärmepumpen kostengünstig thermische Energie vom kalten Erdsondenfeld ins warme Erdsondenfeld zu verschieben und damit die elektrische Energie einigermaßen hochwertig zu deponieren. Ein weiterer Anwendungsfall wäre, dem Stromnetz durch diese Power-to-Heat-Funktionalität Flexibilität zu bieten.

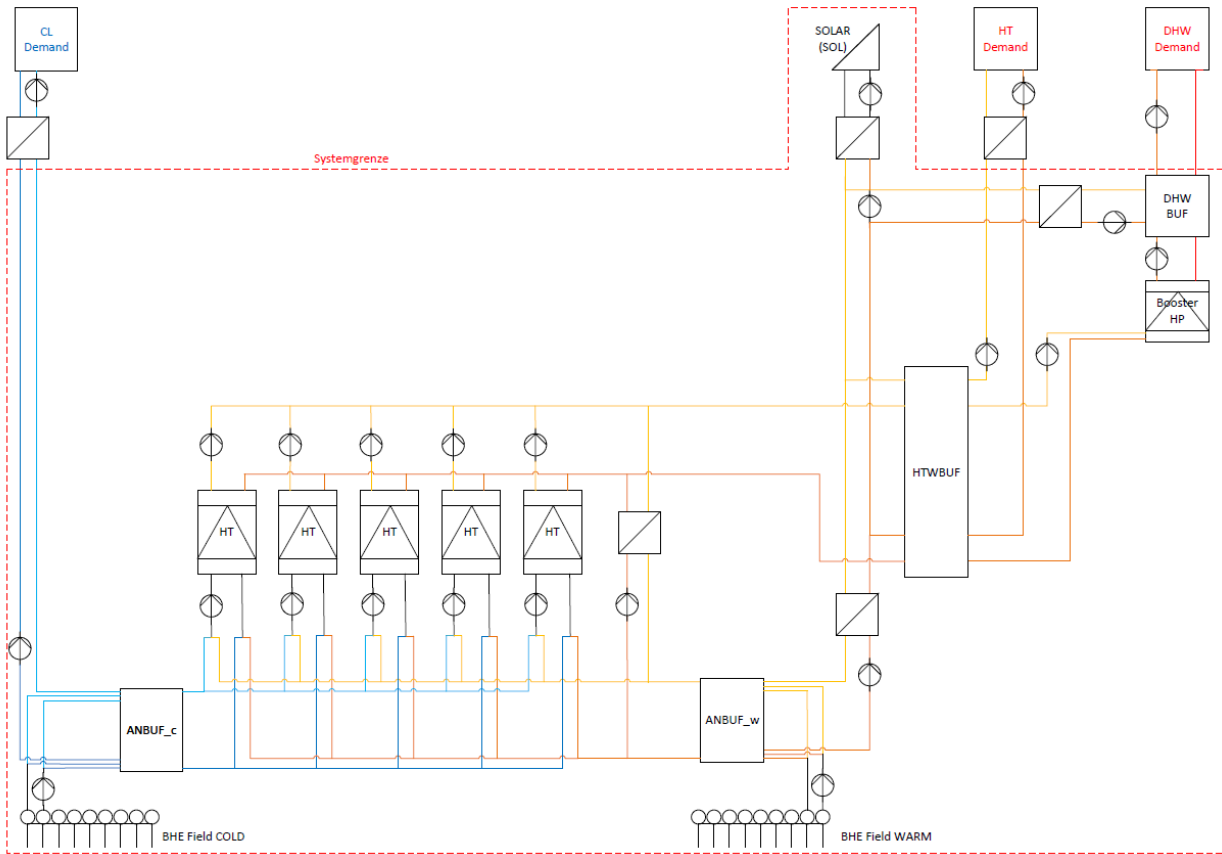


Abbildung 2. Schaltschema des Systems mit zwei Erdsondenfeldern.

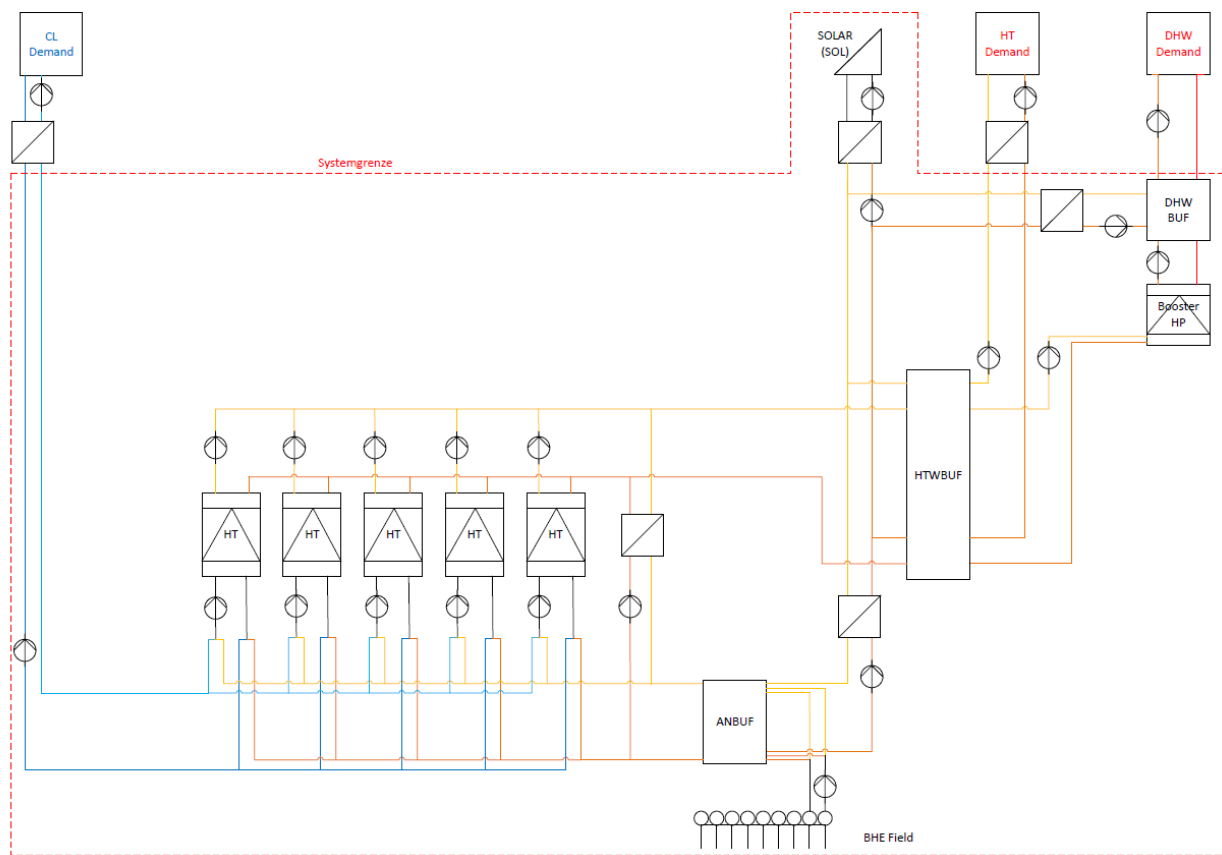


Abbildung 3. Schaltschema des Referenzsystems mit einem Erdsondenfeld.

**Tabelle 2. Kürzel der Komponenten im System.**

Kürzel	Erklärung	Funktion
HTHP	Wärmepumpe	Heben des Temperaturniveaus der Energie aus den Erdsondenspeichern bzw. aus den Anergiepuffern auf 35 °C.
BoosterHP	Booster-Wärmepumpe	Heben des Temperaturniveaus der Energie aus dem Heiz-Pufferspeicher, dem warmen Erdsondenspeicher, oder von der Solarthermie auf 60 °C für die Brauchwassererwärmung.
HT Demand	Heizbedarf	
DHW Demand	Warmwasserbedarf	DHW...Domestic hot water
CL Demand	Kühlbedarf	CL...Cooling
BHE Field WARM	warmes Erdsondenfeld	BHE... Borehole Heat Exchanger; „warmes Feld“
BHE Field COLD	kaltes Erdsondenfeld	„kaltes Feld“
SOLAR	Solarthermie-Kollektoren	
ANBUF_c	Anergieseitiger Pufferspeicher beim kalten Erdsondenfeld	Als hydraulische Weiche zu sehen, keine Speicherwirkung simuliert.
ANBUF_w	Anergieseitiger Pufferspeicher beim warmen Erdsondenfeld	Als hydraulische Weiche zu sehen, keine Speicherwirkung simuliert.
HTBUF	Pufferspeicher für Heizen und Quelle der Booster-WP	„Heiz-Pufferspeicher“
DHWBUF	Pufferspeicher für Brauchwasser	DHW...Domestic hot water

## 2.2 Bedarfsprofile für Heizen, Kühlen und Brauchwasser

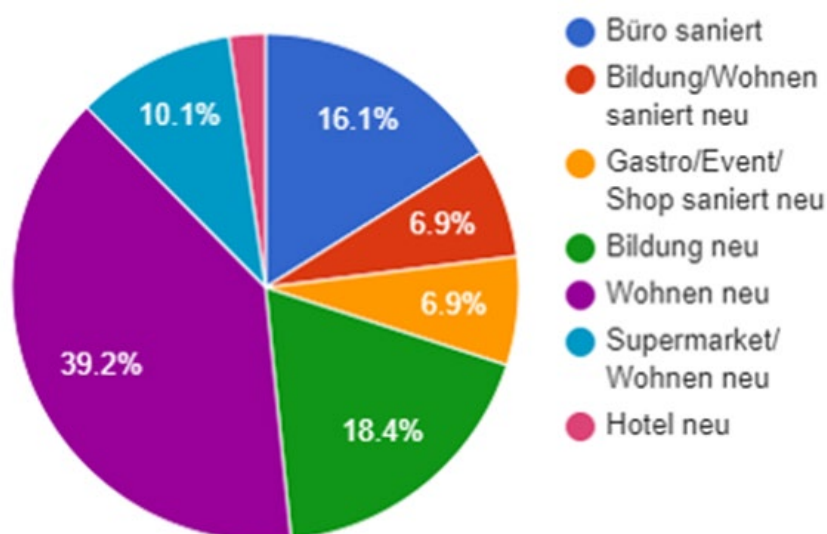
Entsprechend der Zielsetzung des Projekts, nämlich dem Performance-Vergleich eines Erdsondenspeichers aus zwei Feldern bestehend (Zweifeldspeicher) mit einem herkömmlichen Speicher mit nur einem Sondenfeld (Einfeldspeicher) war es notwendig, Bedarfsprofile für das Heizen und Kühlen eines fiktiven Gebäudekonglomerats mit Mischnutzung zu definieren. Es wurde ein Wärmebedarfsüberschuss-Szenario angenommen.

Wärmebedarfsüberschuss:

Für die Simulation wurde angenommen, dass 75 % der von den Gebäuden benötigten thermischen Energie für das Heizen und die Warmwasserbereitung aufzubringen sind, während für das Kühlen nur 25 % benötigt werden. Die Bedarfsprofile wurden aus simulierten Daten aus dem Forschungsprojekt SANBA (Haslinger et al., 2021) erstellt, in welchem Gebäude für den Standort Gumpoldskirchen über ein Jahr unter Verwendung der Klimadaten eines charakteristischen Testreferenzjahres modelliert und simuliert wurden. Die Bedarfsprofile sind somit für ein Jahr erstellt worden und wurden unverändert für den gesamten simulierten Zeitraum verwendet. Für das gegenständliche Projekt wurden Bruttogeschossflächen, wie in Tabelle 3 dokumentiert, angenommen. Den Gebäuden wurden eine Nutzungskategorie und ein Zustand (sanierter Altbau oder Neubau) zugeordnet. Somit ergibt sich eine Mischnutzung, wie in Abbildung 4 dargestellt.

**Tabelle 3. Bruttogeschossflächen des Szenarios W im Projekt Zweifeldspeicher.**

Nutzungskategorie	Zustand	Bruttogeschossfläche BGF / m <sup>2</sup>
Wohnen	neu	21 250
Bildung	neu	10 000
Büro	saniert	8 750
Supermarkt und Wohnen (7:15)	neu	5 500
Bildung und Wohnen (1:1)	saniert und neu	3 750
Gastro, Event und Shops	saniert und neu (2:1=saniert:neu)	3 750
Hotel	Neu	1 250
Summe		54 250



**Abbildung 4. Mischnutzung nach Anteil der Bruttogeschossfläche.**

Aus den Jahresdauerlinien des spezifischen Bedarfs lassen sich die unterschiedlichen Charakteristika der Nutzungskategorien erkennen, sie sind für Heizen, Kühlen und Brauchwasser in Abbildung 5 bis Abbildung 7 zu sehen. In allen Nutzungen, außer in den in Abbildung 7 dargestellten, wird das Brauchwasser elektrisch bereitgestellt. In Abbildung 8 ergeben sich mit den Bruttogeschossflächen die Jahresdauerlinien des Bedarfs.

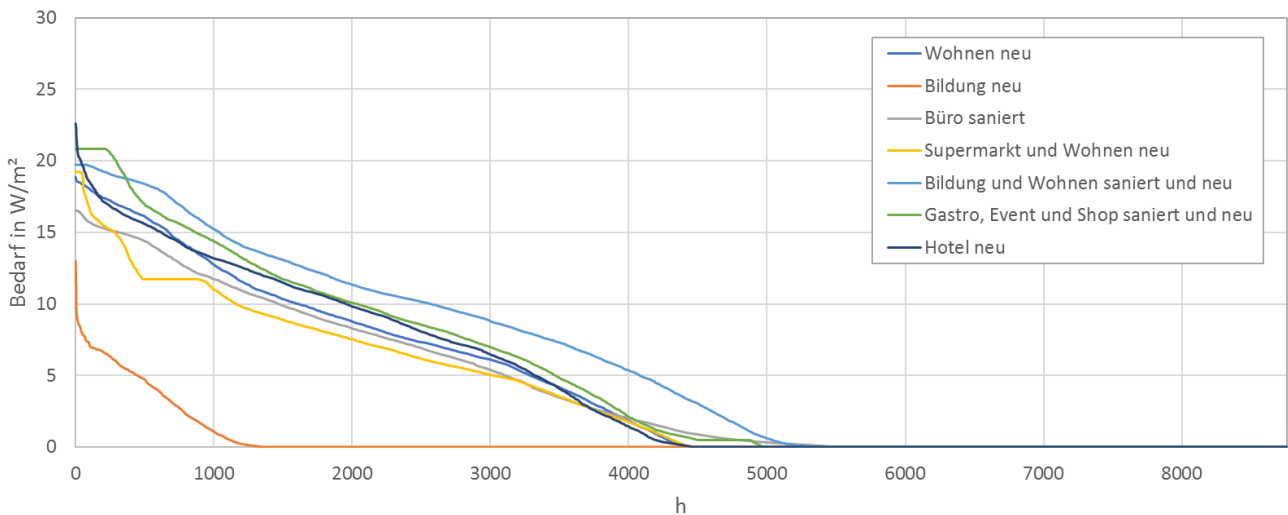


Abbildung 5. Jahresdauerlinien für das Heizen nach Nutzungskategorie.

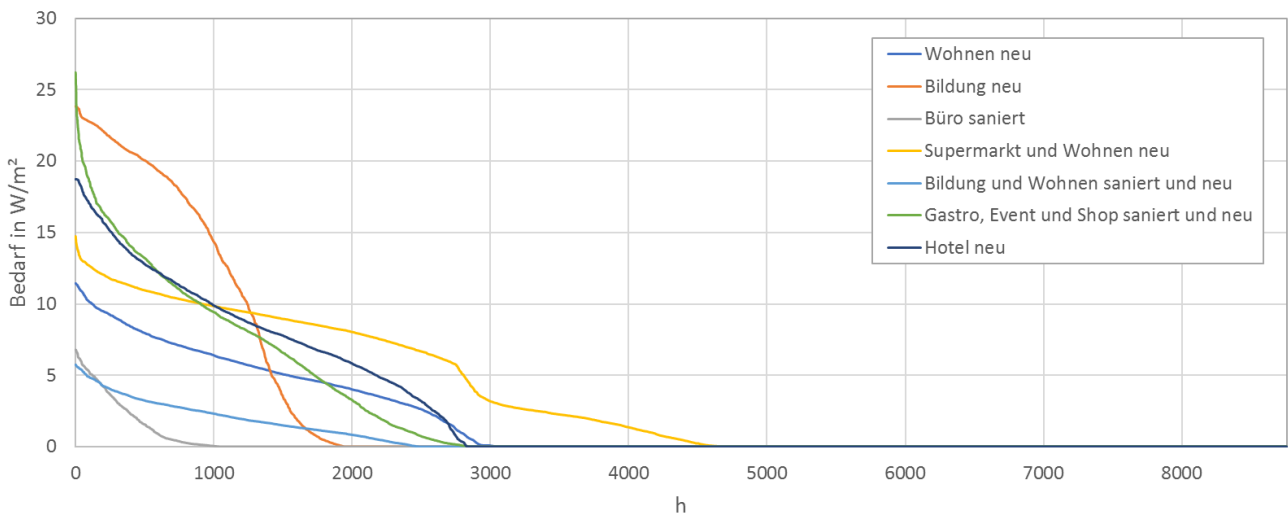


Abbildung 6. Jahresdauerlinien für den Kühlbedarf nach Nutzungskategorie.

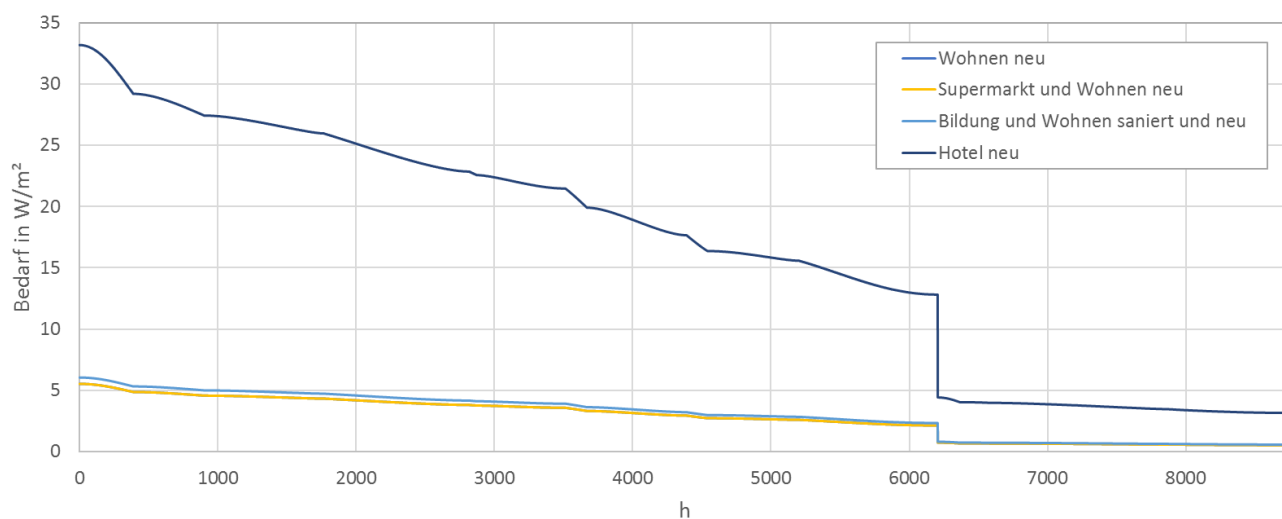


Abbildung 7. Jahresdauerlinien für das Brauchwasser nach Nutzungskategorie.

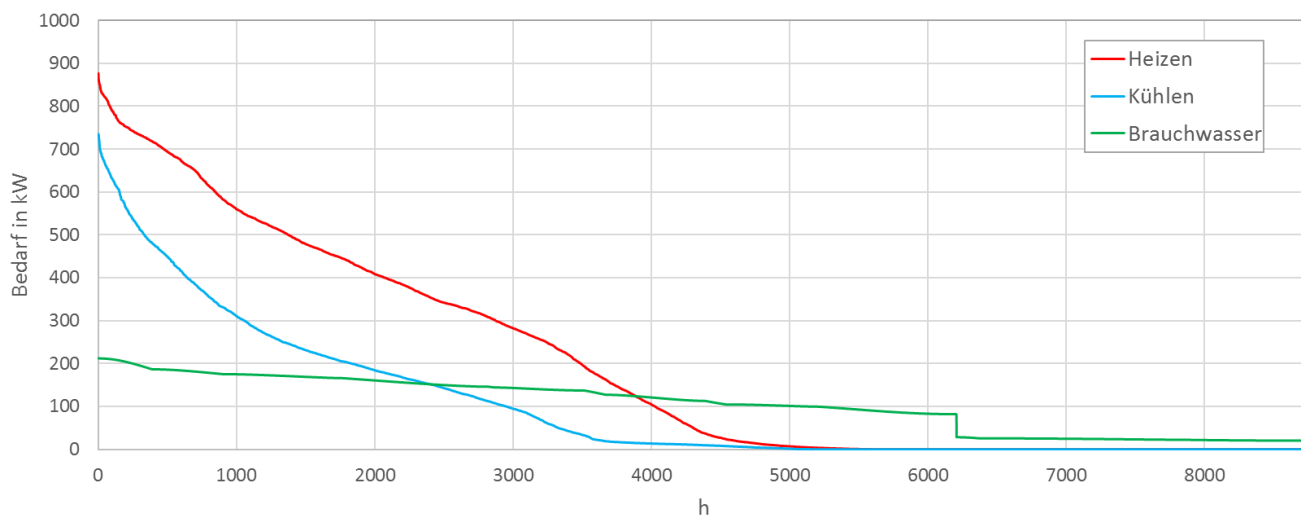


Abbildung 8. Jahresdauerlinien für die gewählten Bedarfsprofile.

## 2.3 Modell der saisonalen Wärmequelle

Zur Verbesserung der Jahresbilanz zwischen Be- und Entladung der Erdsondenspeicher wird eine zusätzliche Wärmequelle benötigt, siehe Kapitel 2.7. Obwohl die Kosten eines unverglasten Kollektors („Schwimmbadabsorber“) vergleichsweise geringer sind, wurde ein verglaster Solarkollektor ausgewählt, damit unterschiedliche Regelstrategien, auch zur Beladung des Heizungs- und Brauchwasserspeichers, getestet werden können. Weiters weisen verglaste Flachkollektoren eine höhere jährliche Gesamteffizienz gegenüber unverglasten Kollektortypen auf. In Tabelle 4 sind die repräsentativen Daten eines solchen Kollektors aufgeführt.

**Tabelle 4. Daten des Solarthermiekollektors**

Technische Daten Kollektor	
$\eta_{opt} = 0,793$	optischer Wirkungsgrad
$\alpha_1 = 4,03 \frac{W}{m^2K}$	linearer Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha_2 = 0,01 \frac{W}{m^2K^2}$	Quadratischer Wärmeübergangskoeffizient
Kollektor-Aufstellung	
$\beta = 0^\circ$	Kollektorneigung

### 2.3.1 Solarthermie - Berechnung

Der Ausgangspunkt für die Berechnung der nutzbaren Wärmeleistung aus den Solarthermiekollektoren war ein von der ZAMG (seit 2023: GeoSphere Austria) berechnetes Testreferenzjahr für Gumpoldskirchen für den Zeitraum 2009 bis 2018, welches unter anderem Werte zur direkten und diffusen Strahlung, zur Umgebungstemperatur, sowie den Sonnenstand in stündlicher Auflösung enthält. Die gleichen Daten wurden zur Berechnung des Gebäudebedarfs verwendet. Mit der Kollektorneigung und Ausrichtung kann daraus die Einstrahlung auf den Kollektor  $\dot{q}_{Str,Koll}$  berechnet werden, welche als Inputwert für die Simulation verwendet wurde.

Zur Berechnung der nutzbaren Wärmeleistung  $\dot{Q}_{Nutz}$  wurde folgender Ansatz gewählt:

$$\dot{Q}_{Nutz} = A_{Koll} \cdot (\eta_{opt} \cdot \dot{q}_{Str,Koll} - \alpha_1 \cdot (T_{Koll} - T_U) - \alpha_2 \cdot (T_{Koll} - T_U)^2)$$

mit der Kollektorfläche  $A_{Koll}$ , dem optischen Wirkungsgrad  $\eta_{opt}$ , den linearen und quadratischen Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$ , der mittleren Kollektortemperatur  $T_{Koll}$  und der Umgebungstemperatur  $T_U$ . Die Wärmeverluste des Kollektors werden über die lineare und quadratische Temperaturdifferenz zur Umgebung angenähert. Die mittlere Kollektortemperatur kann dabei vereinfacht als arithmetischer Mittelwert der Ein- und Austrittstemperaturen in den Kollektor angesetzt werden. Je nach Betriebsmodus des Gesamtsystems ergeben sich aufgrund der verschiedenen Ein- und Austrittstemperaturen auch verschiedene nutzbare Wärmeleistungen, sowie Massenströme.

### **2.3.2 Betriebsweise der Solarthermie**

Es wurden im Zuge der Simulationen auch verschiedene Betriebsweisen der Solarthermie untersucht. Üblicherweise wird eine Solarthermie zur Trinkwassererwärmung eingesetzt, für die aktuelle Fragestellung kann es aber auch zielführend sein, die Solarthermie mit einem stärkeren Durchfluss auf geringerer Temperatur zu betreiben um damit die thermische Ausbeute zu maximieren.

*Niedertemperaturbetrieb:* Im Niedertemperaturbetrieb wird zuerst das Erdsondenfeld beladen und das Solarmodul läuft auf dessen Temperaturniveau, normalerweise zwischen 10 und 30 °C. Erst wenn die Vorlauftemperatur des Sondenfeldes die festgelegte Beladegrenze von 30 °C erreicht, wird der Heizungspuffer mit 35 °C beladen. Zusätzlich kann in der Simulation eine Überbeladung der Puffer eingestellt werden, wodurch ein Solarüberschuss im Sommer genutzt werden kann, um den Heizungspuffer auf eine höhere Temperatur von beispielsweise 75 °C zu beladen. Der momentane Solarüberschuss kann in den folgenden Zeitschritten zur Brauchwassererwärmung oder Sondenfeldregeneration genutzt werden.

*Hochtemperaturbetrieb:* Im Hochtemperaturbetrieb speist die Solarthermie zuerst die Brauchwasser- und Heizungspuffer, und erst wenn diese voll beladen sind wird die Erdwärme regeneriert. Der flächenspezifische Ertrag des Solarmoduls sinkt im Vergleich zum Niedertemperaturbetrieb und muss daher größer dimensioniert werden um eine Bilanzierung des Erdsondenfelds zu erreichen.

## **2.4 Hydraulik: abgeschätzte Druckverluste, Volumenströme und Pumpenauswahl**

Als Pumpe wurde entsprechend den Parametern in Tabelle 5 eine geregelte Blockpumpe nach EN733 der Firma Grundfos (Typ NBE 80-160/146) ausgewählt. Die gleiche Pumpe ist für die verschiedenen Einsatzorte im System geeignet. Bei größeren erforderlichen Massenströmen, wie sie bei der Verbindungsleitung vom Erdsondenfeld zur Energiezentrale notwendig sind, müssen mehrere Pumpen parallel eingesetzt werden.



**Tabelle 5. Parameter zur Auswahl der Pumpen.**

Druckverlust Wärmepumpe kalte Seite	
$\Delta\vartheta_K = 3 \text{ K}$	Temperaturspreizung
$\dot{V}_K = 50 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	Volumenstrom pro Wärmepumpe, kalte Seite
$\Delta p_{PK} = 12 \text{ kPa}$	Druckverlust (nur Druckverlust kalte Seite Wärmepumpe)
Druckverlust Leitung Sondenfeld bis Anergiepuffer	
$l = 200 \text{ m}$	Geschätzte Länge der Rohrleitung, DN300
$\dot{V}_{RSF} = 0,069 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	Volumenstrom (alle 5 Wärmepumpen laufen gleichzeitig)
$\Delta p_{RSF} = 20,025 \text{ kPa}$	Druckverlust zufolge Rohrreibung
Druckverlust Sondenfeld (zufolge Rohrreibung, Umlenkung, Ein- und Austrittsdruckverlust)	
$\dot{V}_{Sonde} = 0,35 \frac{\text{l}}{\text{s}}$	Volumenstrom je Sonde
$\Delta p_{RS} = 6,648 \text{ kPa}$	Druckverlust über Doppel U-Rohr-Sonde, 2x DN32, 150 m lang

## 2.5 Modell der Wärmepumpe

Die Wärmepumpe basiert auf einem physikalischen Modellansatz, der mit Hilfe von Prüfstandsdaten einer „generischen“ Sole-Wasser Wärmepumpe validiert wurde. Zusätzlich bilden die technischen Daten der ausgewählten Produkte die Basis für den Abgleich des Modells mit realen Daten, siehe, Abbildung 9.

TECHNISCHE DATEN						
Type TERRA SW Max mit dem Kältemittel R410A <sup>2)</sup>						
$T_{\text{source in}} [^{\circ}\text{C}]$	$dT_{\text{source}} [\text{K}]$	$T_{\text{sink out}} [^{\circ}\text{C}]$	$dT_{\text{sink}} [\text{K}]$	$m_{\text{flow source}} [\text{kg/s}]$	$V_{\text{flow source}} [\text{m}^3/\text{h}]$	
0	-0.40	2.92	45.29	5.24	2.75	9.90
1	-0.19	2.92	54.85	5.02	2.51	9.02
2	-0.22	2.85	65.32	4.91	2.13	7.66
3	0.30	3.12	65.12	9.99	2.17	7.82
4	-0.38	3.05	54.60	10.15	2.55	9.18
5	0.26	3.13	44.75	9.64	2.70	9.73
6	4.53	3.07	45.34	9.99	3.41	12.28
7	4.81	2.89	55.06	9.95	3.19	11.49
8	5.28	2.97	64.90	10.03	2.89	10.39
•••••						

TERRA SW 55-280 Max (HGL)										
Einheit	55	70	85	110	140	170	220	280		
Energieeffizienzklasse Sole <sup>1)</sup>	A+++/A++	A+++/A++	3)	3)	3)	3)	3)	3)	3)	
maximale Vorlauftemperatur	°C 62									
50°C/W35°C	Heizleistung	57,87	73,19	84,82	113,42	137,79	169,63	226,84	275,59	
	elektr. Leistungsaufnahme	12,50	15,91	18,32	24,55	29,89	36,64	49,10	59,78	
	COP	-	4,63	4,60	4,63	4,62	4,61	4,63	4,62	4,61
Energieeffizienzklasse Grundwasser <sup>1)</sup>	A+++/A+++	3)	3)	3)	3)	3)	3)	3)	3)	
W10°C/W35°C	Heizleistung	76,86	97,20	112,76	149,14	181,06	225,51	298,27	362,13	
	elektr. Leistungsaufnahme	12,66	16,56	19,08	26,03	31,27	38,16	52,05	62,54	
	COP	-	6,07	5,87	5,91	5,73	5,79	5,91	5,73	5,79
Kühlung	IDM Kühlung (Prozessumkehr)									
	530°C/W18°C	Kühlleistung	79,21	104,68	122,74	157,02	177,39			
		elektr. Leistungsaufnahme	13,50	17,71	20,10	28,29	32,82			
EER		-	5,87	5,91	6,11	5,55	5,40			
Kühlung	iDM-Systemkühlung (passive und aktive Kühlung)									
	57°C/W35°C	Kühlleistung	56,90	71,0	81,2	108,4	131,2	162,4	216,8	262,5
		Abmessungen (H/B/T)	mm 2019/1066/776			2019/1317/774		2019/2154/776	2019/2654/776	
Betriebssicherheit/Leistungsanpassung		2 getrennte, redundante Kältekreisläufe			4 getrennte, redundante Kältekreisläufe					
Regelung	NAVIGATOR 2.0									

**Abbildung 9: Validierungsdaten des Wärmepumpenmodells.**

Dymola/Modelica bildet die Simulationsumgebung für das physikalische Modell. Durch die komponentenweise Abbildung des Kältekreislaufes inkl. dem passenden Kältemittel ist es möglich das Modell nicht nur mit den Prüfstandsdaten sehr akkurat abzugleichen, sondern auch darüber hinaus - ohne großes Risiko - zu extrapolieren, siehe Abbildung 10 und Abbildung 11.

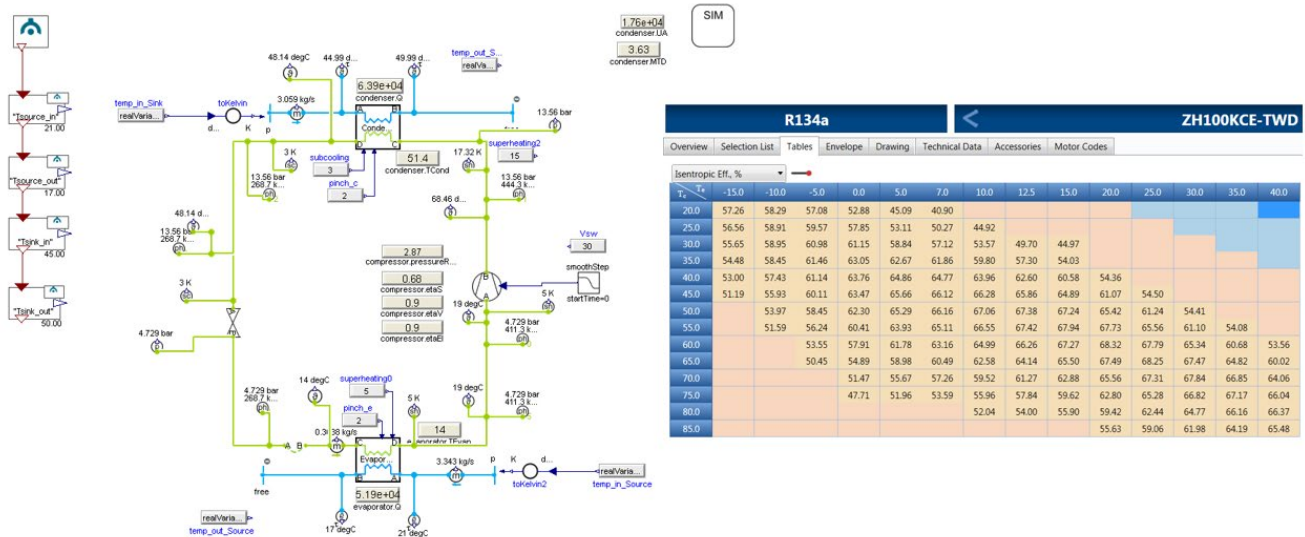


Abbildung 10: Physikalisches Wärmepumpenmodell in Dymola/Modelica (links) und Verdichtherstellerdaten (rechts).

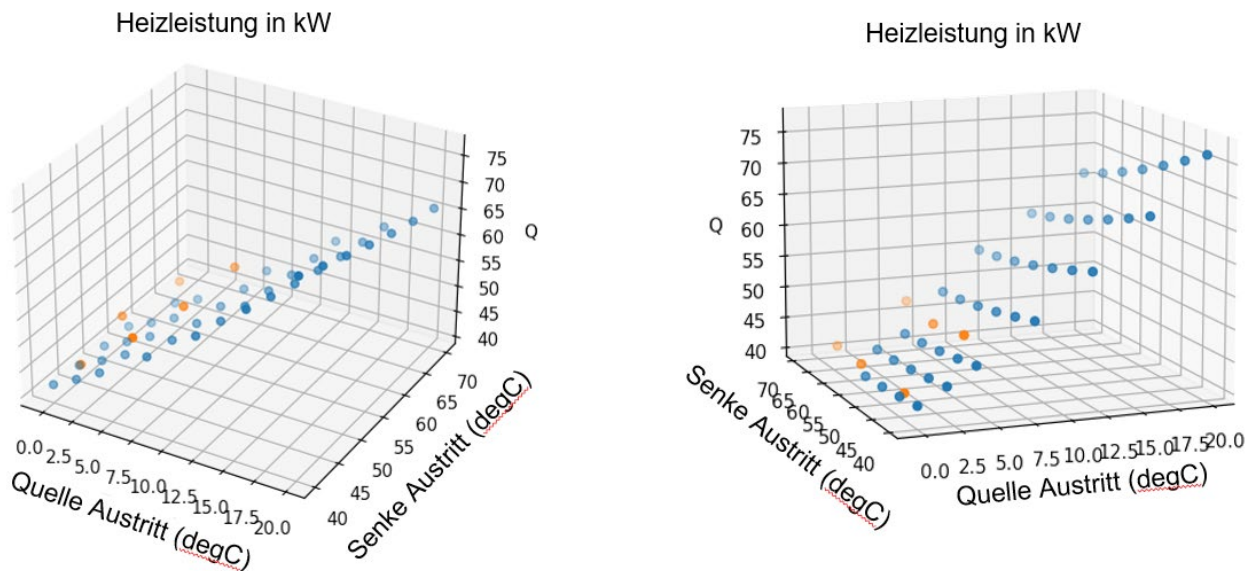
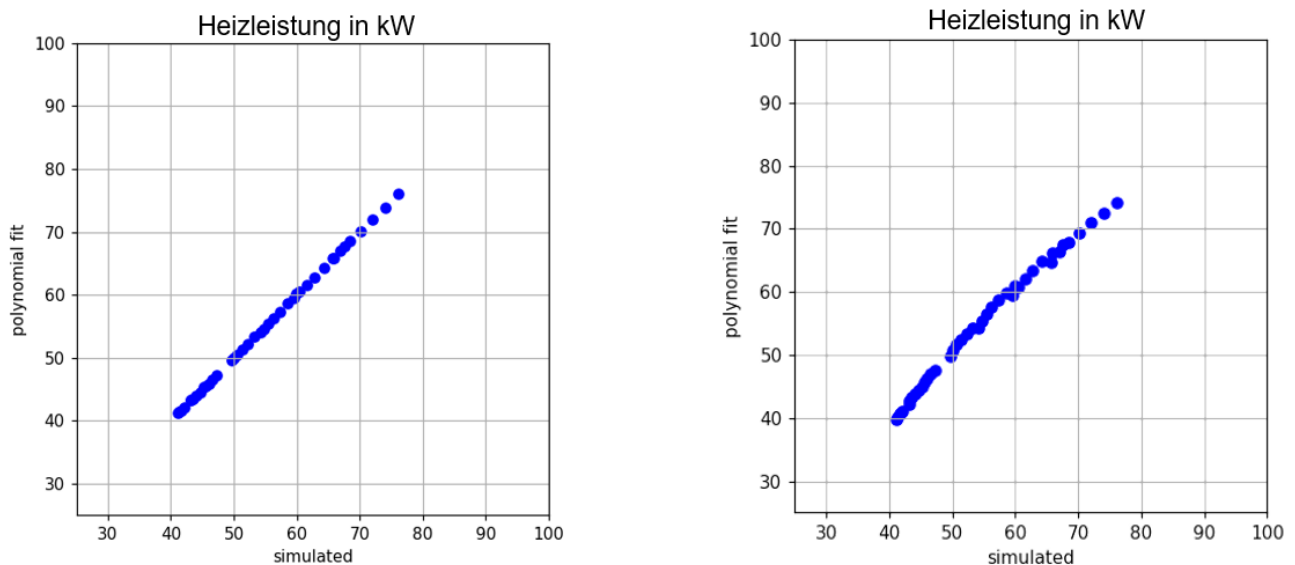


Abbildung 11: Original Prüfstandsdaten (orange) sowie extrapolierter Bereich (blau) für die Anwendung in Zweifeldspeicher.

Für die Verwendung in Zweifeldspeicher ist jedoch die Anwendung eines physikalischen Modells aufgrund zu hoher Simulationszeiten nicht optimal. Daher wird mit dem physikalischen Wärmepumpenmodell ein datengetriebenes Modell parametrisiert. In der Simulation wurden die abgegebene Heizleistung  $\dot{Q}$ , die aufgenommene Wärmeleistung  $\dot{Q}_{source}$  und die benötigte elektrische Leistung  $P$  berechnet und mit einem

linearen oder quadratischen Ansatz „gefittet“. Abbildung 12 zeigt einen Vergleich der Heizleistung zwischen einem quadratischen Fit (links) und einen linearen Fit (rechts). Der quadratische Ansatz lässt eine qualitativ sehr hochwertige Annäherung vermuten, wobei die Abweichung des linearen Ansatzes ebenfalls unter 5 % liegt, jedoch Vorteile bei Rechenzeit bietet.

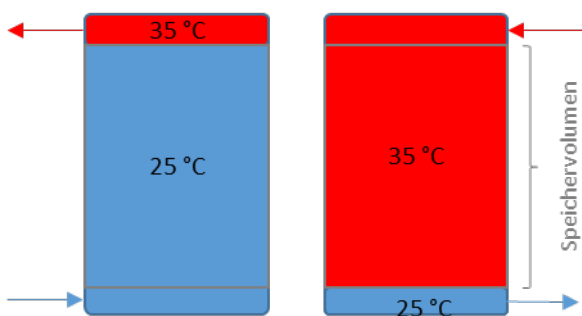


**Abbildung 12: Vergleich der Heizleistung zwischen dem physikalischen Wärmepumpenmodell mit einem quadratischen Fit (links) und einen linearen Fit (rechts).**

Ob quadratisch oder linear, um schließlich mit dem Modell einen beliebigen Leistungsbereich abzudecken und die Größen  $P$ ,  $\dot{Q}$  und  $COP$  näherungsweise berechnen zu können, werden die Leistungsgrößen skaliert und die gewünschten Nenngrößen ins Verhältnis zu den Referenzgrößen gesetzt, siehe Herstellerangaben in Abbildung 9.

## 2.6 Modell der Pufferspeicher

Die Pufferspeicher auf der warmen Seite der beiden Wärmepumpen werden als idealisierte Zwei-Schicht-Speicher ohne Wärmeverluste in der Simulation berücksichtigt, siehe Abbildung 13.



**Abbildung 13: Idealisierter Heizungs-Pufferspeicher (HTBUF) mit Speicherzustand 0 % (links) und 100 % (rechts)**

In der Simulation wird für jeden Zeitschritt der Ladezustand der Puffer in Prozent berechnet, je nachdem wieviel gerade entnommen oder eingespeist wird. Sinkt der Ladezustand des Brauchwasserpuffers

(DHWBUF) unter 50 %, so wird die Booster-Wärmepumpe eingeschaltet. Diese entnimmt aus dem Heizungspuffer (HTBUF) gemeinsam mit dem Heizungsbedarf der Gebäude und mit einer möglichen Beladung durch das Solarmodul. Die Energiebilanz bestimmt, wieviel Wärmepumpen benötigt werden. Beispielsweise könnten rechnerisch 3,7 Wärmepumpen benötigt werden, wobei bei einem Pufferladestand von unter 50 % auf 4 aufgerundet wird, also 4 Wärmepumpen eingeschaltet werden und bei einem Pufferladestand von über 50 % wird auf 3 abgerundet. Ist die Puffergröße ausreichend groß auf die Wärmepumpe dimensioniert, so schwankt der Pufferladestand immer zwischen 0 % und 100 %.

In der Simulation kann bei Solarüberschuss auch eine Überbeladung des Heizungspuffers durch das Solarmodul eingestellt werden. Dadurch kann der Puffer im Sommer auf über 100 % geladen werden, d. h. die Temperatur steigt beim Heizungspuffer über die übliche Beladetemperatur von 35 °C, z. B. bis 500 % auf 75 °C. Die höhere Temperatur der Beladung wird in der Simulation für die Verlustleistung des Solarmoduls berücksichtigt. Der momentane Solarüberschuss kann somit in den folgenden Zeitschritten genutzt werden.

## 2.7 Modell der Erdsondenspeicher

### 2.7.1 Grundlagen zum Erdsondenpotenzial

Die Leistungsfähigkeit einer Erdsondenanlage lässt sich gut mit der vereinfachten Formel aus Abbildung 14 erklären. Demnach ist die Leistung direkt proportional zur Temperaturdifferenz des ungestörten Erdreichs und der mittleren Temperatur des Wärmeträgerfluids zwischen Eintritt und Austritt der Sonde. Die erzielbare Leistung ist folglich von den zulässigen Temperaturgrenzen abhängig. Im gegenwärtigen Projekt wurden diese auf -1,5°C im Heizfall und 28 °C im Kühl- oder Regenerationsfall gelegt. Die ungestörte Erdreichtemperatur für unseren Referenzfall liegt bei 13,3 °C. Damit beträgt die Temperaturdifferenz im Heizfall 14,8 K und im Kühl- und Regenerationsfall 14,7 K. Die Leistung wird vom Bohrloch-Widerstand  $R_b$  und vom Erdreich-Widerstand  $R_g$  begrenzt. Ersterer ist nur von der Geometrie und Materialwahl der Sonde abhängig und bei Betrieb mit ähnlicher Durchflussgeschwindigkeit somit zeitlich konstant. Der Erdreich-Widerstand ist hingegen zeitlich variabel, d. h. er ist neben der Sondenanordnung des Feldes und den Wärmeleit- und Speichereigenschaften des Erdreichs auch von der Vorgeschichte des Be- und Entladens, also der Betriebsweise von Heizen und Kühlen abhängig. Diese vereinfachte Darstellung beruht auf der analytischen Lösung einer Erdsondenanlage mit Hilfe der g-Funktionen (Eskilson, 1987).

<p>Temperaturdifferenz <math>\Delta T</math>  <i>(Fluid – ungestörtes Erdreich)</i></p>	<p>Erdreich-Widerstand <math>R_g</math>  <i>(zeitlich variabel)</i></p>	<p>abhängig von</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sondenanordnung (Sondenanzahl, Sondenabstand, ..)</li> <li>• Wärmeleit- und –speichereigenschaften Erdreich</li> <li>• Betriebsweise Heizen &amp; Kühlen</li> </ul>
$P(t) = \Delta T \cdot \left( \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_g(t)} \right)$		
	<p>Bohrloch-Widerstand <math>R_b</math>  <i>(zeitlich konstant)</i></p>	<p>abhängig von</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rohrquerschnitt</li> <li>• Rohranordnung</li> <li>• Wärmeleitfähigkeit des Geothermie-Mörtels</li> <li>• Wärmeträgermedium (Wasser, Frostschutzgemisch)</li> <li>• Durchflussgeschwindigkeit (laminar-turbulent)</li> </ul>

Abbildung 14: vereinfachte Darstellung der Leistungsabhängigkeit von Erdwärmesonden

## 2.7.2 Auswahl des Simulationstools

Zur Simulation von Erdsondenfeldern standen zu Projektbeginn drei Simulationstools zur Verfügung. 1) Earth Energy Designer (kurz EED) von Blocon AB, 2) Feflow von DHI WASY und 3) das Python Modul pygfunction (Cimmino & Cook, 2022) von der Technologischen Universität Montreal, welches bereits von der Geologischen Bundesanstalt (seit 2023 GeoSphere Austria) zur Potenzialprognose im Rahmen des Projekts GEL-SEP (Green Energy Lab - Räumliche Energieplanung für die Wärmewende: <http://waermeplanung.at>) erfolgreich angewendet wurde. Für die Simulation eines „Zweifeldspeichers“ wurden folgende fünf Anforderungen an die Simulation definiert:

- I. Kopplung der Wärmepumpenleistung mit Quelltemperatur des Erdsondenfeldes
- II. Kopplung der Wärmequelle (Solarmodul) mit Quelltemperatur des Erdsondenfeldes
- III. Kopplung der beiden Sondenfelder: Be- und Entladestrategie an Ladezustand der beiden Sondenfelder anpassen
- IV. Schnelle Rechenzeit auf 20 Jahre bei stündlicher Leistungsvorgabe
- V. Geringer Aufwand für Modellerstellung

Die These zu Projektbeginn war, dass sich durch die Teilung eines großen Erdsondenfeldes in ein „warmes“ und ein „kaltes“ Feld Vorteile für diesen „Zweifeldspeicher“ ergeben müssten, insbesondere durch die bessere Leistungszahl der Wärmepumpe. Dafür schien eine Kopplung der Wärmepumpenleistung mit der Quelltemperatur (Anforderung I) essentiell. Zudem muss das Regelungssystem zu jedem Zeitpunkt den Ladezustand beider Felder kennen um die Leistung gezielt steuern zu können (Anforderung III). Die Abhängigkeit des Einspeisepotenzials der Wärmequelle (Solarmodul) vom Ladezustand des Erdsondenfeldes wurde ebenso als wichtig eingestuft, sowohl für den Einfeldspeicher, als auch für den Zweifeldspeicher (Anforderung III). Natürlich ist dabei eine kurze Rechenzeit, als auch ein geringer Aufwand für die Szenarien-Modellierung wünschenswert (Anforderung IV, V). Es zeigte sich rasch, dass die Vorteile der finiten Elemente Simulation mit FEFLOW, nämlich die Simulation der Erdsondenfelder in einem heterogenen Untergrund mit Grundwassereinfluss, nicht genutzt werden. Zwar gibt es eine Schnittstelle mit Python in jedem Simulations- und Zeitschritt, jedoch ist der Aufwand für die 3D-Modellerstellung und die Rechenzeit sehr hoch. Mit EED konnten die Kopplungen nicht realisiert werden, wodurch die Auswahl auf das frei programmierbare Modul pygfunction fiel. Damit ist es möglich, die g-Funktionen zur Simulation der Erdsondenfelder für jede beliebige Sonden-Anordnung zu berechnen und mit relativ einfachen Befehlen die Temperaturantwort eines Erdsondenfeldes bei stundenweiser Vorgabe von Leistungsanforderungen zu ermitteln. Die Kopplung mit den Wärmepumpen, den Pufferspeichern, dem Solarmodul und den Anforderungen des Gebäudes wurde in ZWEIFELDSPEICHER entwickelt und „PYG“ genannt. Eine Übersicht zur Auswahl ist in Abbildung 15 zusammengefasst.

	I. Kopplung Wärmepumpe - Erdsonden	II. Kopplung Wärmequelle - Erdsonden	III. Kopplung ZWEI Sondenfelder	IV. Rechenzeit	V. Aufwand Modellerstellung
1. EED - Earth Energy Designer	NEIN	NEIN	NEIN	Schnell (< 5 Minuten)	Gering
2. FeFlow	Möglich über Python Schnittstelle	Möglich über Python Schnittstelle	Möglich über Python Schnittstelle	Sehr Lange (> 24 h)	Hoch
3. PYG - Python Modul pygfunction	Möglich über Python Code	Möglich über Python Code	Möglich über Python Code	Sehr schnell (< 2 Minuten)	Gering

Abbildung 15: Vergleich der verfügbaren Simulationstools mit den fünf Kriterien für Zweifeldspeicher

### 2.7.3 Validierungssimulationen

Um die Ergebnisse von PYG zu validieren und Programmierfehler auszuschließen, wurde das bekannte Dimensionierungstool für Erdwärmesonden EED verwendet. Beide Programme beruhen auf der analytischen Lösung der Erdsondengleichung (vergleiche Abbildung 15) mit numerischer Berechnung der g-Funktionen. Für die Validierungssimulationen wurden in beiden Programmen möglichst gleiche Parameter mit Vorgabe einer stündlich variierenden Sondenleistung für das Sondenfeld und das Erdreich gesetzt. Die Temperaturantwort ist in Abbildung 16 zum Vergleich für ein Sondenfeld mit 132 Sonden (11x12) und 150 m Bohrtiefe dargestellt. Auf den ersten Blick ist die Temperaturantwort von EED und PYG ident. Bei direkter Differenzbildung der Temperatur in EED und PYG zeigt sich eine geringfügige Abweichung von maximal 0,4 Kelvin, wobei auch die Umsetzung der Leistungsvorgabe ( $\Delta T_{VGL}$ ) zwischen den Tools geringfügig abweicht. Jedenfalls ist kein Offset oder Trend erkennbar, weshalb die Validierung als erfolgreich eingestuft werden konnte.

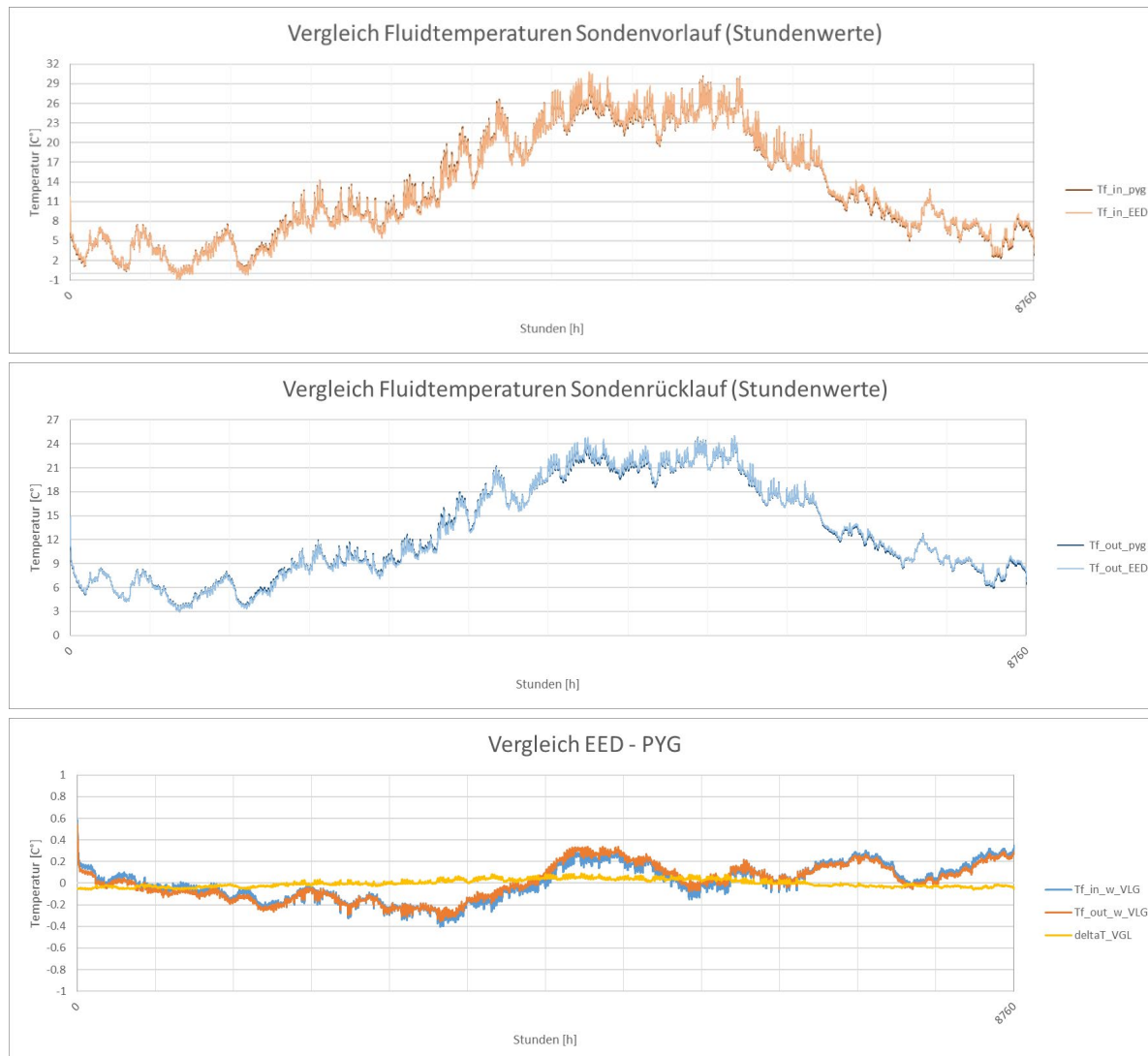


Abbildung 16: Erdsondensimulation in PYG und EED im Vergleich. Oben: Vorlauftemperaturen, Mitte: Rücklauftemperaturen, Unten: Differenz der Vorlauftemperaturen ( $T_{f\_in\_w\_VLG}$ ) und Rücklauftemperaturen ( $T_{f\_out\_w\_VLG}$ ), sowie Differenz der Leistungsvorgabe in Form der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf ( $\Delta T_{VGL}$ )

## 2.7.4 Speicher-, Quellbetrieb und Sondenabstand

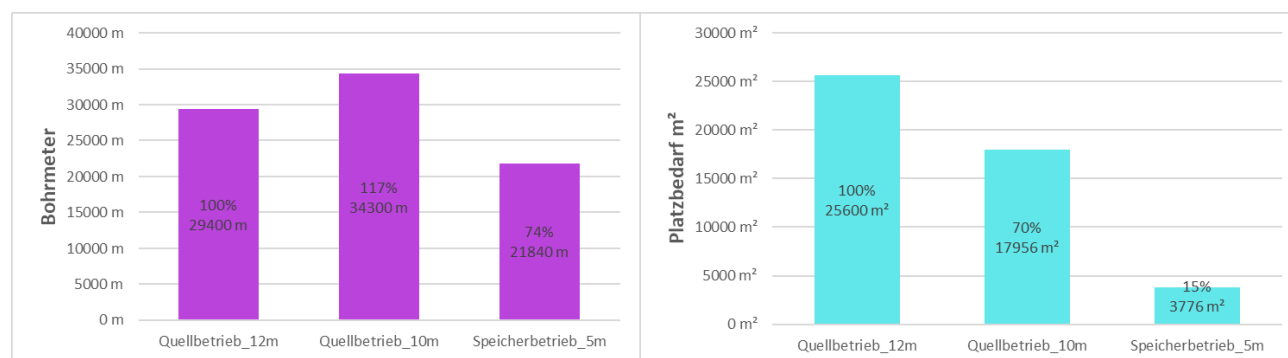
EED und PYG wurden ebenso für grundlegende Erdsonden-Simulationen genutzt, beispielsweise um den Unterschied der Betriebsweise und dessen Zusammenhang mit dem Sondenabstand und somit dem Platzbedarf und der Reichweite des Temperatureinflusses bestimmter Sondenfelder abzustecken.

Ein lehrreiches Beispiel ist in Abbildung 17 dargestellt und zeigt den Unterschied zwischen Quellbetrieb und Speicherbetrieb eines Erdsondenfeldes (Einfeldspeicher) mit gleicher Annahme des Gebäudebedarfs für Heizen und Kühlen im Verhältnis 3:1. Im „**Quellbetrieb**“ wird das Erdsondenfeld vorwiegend als Quelle genutzt, d. h. es wird wesentlich mehr Heizenergie übers Jahr entzogen als durch Gebäudekühlung wieder zurückgeben. Dadurch kühlt das Erdreich jährlich etwas ab, wodurch ein großer Sondenabstand von mindestens 10 m notwendig wird um einen akzeptable spezifische Sondenleistung ( $>30 \text{ W/lm}$ ) auch nach 20 Jahren zu gewährleisten. Im „**Speicherbetrieb**“ wird die Jahresenergiebilanz durch eine Zusatzquelle außerhalb der Heizperiode ausgeglichen, d. h. es wird etwa gleich viel Energie durch Gebäudekühlung und die **Zusatzquelle** in die Erdsonden gespeist wie für Heizung und Warmwasser entnommen wird. Es kann von einem **Erdsondenspeicher** gesprochen werden, die Untergrundtemperatur ist nur in der nächsten Umgebung der einzelnen Sonden saisonal beeinflusst. Daher kann der Sondenabstand bei bilanzierter Betriebsweise auf bis zu 5 m reduziert werden.

Abbildung 17 vergleicht die notwendige Größe eines Sondenfeldes im Quellbetrieb und im Speicherbetrieb, sodass eine Vollversorgung der Gebäude über mindestens 20 Jahre möglich ist.

Im Vergleich Quellbetrieb mit 12 m Sondenabstand zeigt sich, dass bei 10 m Sondenabstand ca. 17 % mehr Bohrmeter notwendig sind, jedoch der Platzbedarf des Sondenfeldes um ca. 30 % geringer ist. Der Vergleich mit einem Speicherbetrieb mit 5 m Sondenabstand zeigt eine Einsparung an Bohrmeter von mehr als 25 % und einen Flächenbedarf von 15 % des Quellbetriebs mit 12 m, allerdings muss das Sondenfeld durch eine Zusatzquelle (z. B. Nutzung von Solar- oder Luftwärme) bilanziert werden.

**Fazit: Für größere Erdsondenanlagen mit weit über 10 Erdsonden ist ein Speicherbetrieb sinnvoll. Die Jahresenergiebilanz sollte auf etwa  $\pm 10 \%$  mit einer Zusatzquelle ausgeglichen werden.**



**Abbildung 17: Bohrmeter und Platzbedarf eines Erdsondenfeldes abhängig von zwei Betriebsweisen mit unterschiedlichem Sondenabstand: Quellbetrieb mit 12 m Sondenabstand, Quellbetrieb mit 10 m Sondenabstand, Speicherbetrieb mit 5 m Sondenabstand.**

### 2.7.5 Dimensionierungsziele der Erdsondenanlage

Aus den Normen und Empfehlungen für Erdwärmesonden und auf Grundlage von durchgeführten Basissimulationen wurden folgende Dimensionierungsziele für die Erdsondenspeicher festgelegt:

#### EINFELDSPEICHER:

- minimale Sondenvorlauftemperatur:  $-3^{\circ}\text{C}$
- maximale Sondenvorlauftemperatur:  $30^{\circ}\text{C}$
- Ausgeglichen Jahresenergiebilanz (Ziel  $\pm 5\%$ ) -> Dimension Solarabsorber anpassen

#### ZWEIFELDSPEICHER:

- minimale Sondenvorlauftemperatur Feld WARM und KALT:  $-3^{\circ}\text{C}$
- maximale Sondenvorlauftemperatur Feld WARM:  $30^{\circ}\text{C}$ , Feld KALT:  $21^{\circ}\text{C}$
- Jahresenergiebilanz WARM (Ziel  $+10\%$ ) -> Dimension Solarabsorber anpassen
- Jahresenergiebilanz KALT (Ziel  $-10\%$ ) -> etwas mehr Heizen als Kühlen

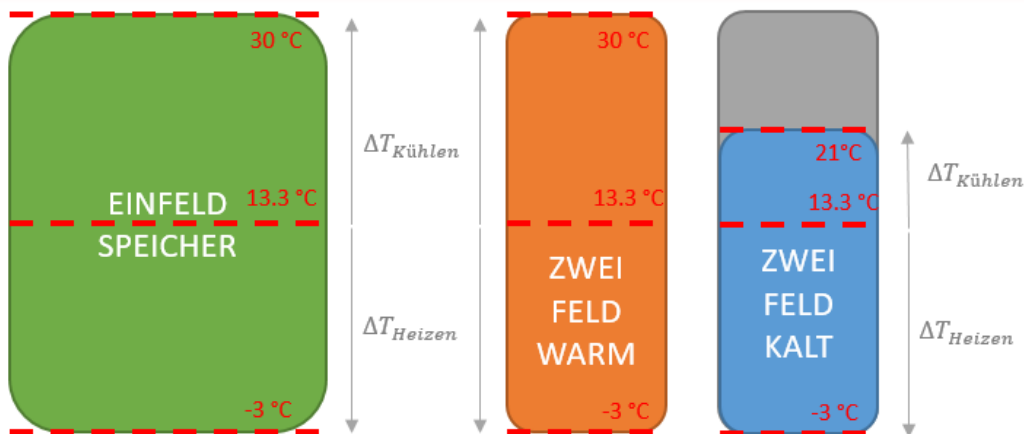


Abbildung 18: Temperaturrendbedingungen als Dimensionierungsziel

Sowohl beim Einfeldspeicher als auch beim Zweifeldspeicher wurde die minimale Sondenvorlauftemperatur im Heizbetrieb auf  $-3^{\circ}\text{C}$  festgelegt, siehe Abbildung 18. Folglich muss die Dimension der Erdspeicher so groß gewählt werden, dass diese Temperatur nicht unterschritten wird. Im Kühl- oder Beladebetrieb wurde die maximale Sondenvorlauftemperatur auf  $30^{\circ}\text{C}$  festgelegt, wobei die Temperaturgrenze für freie Kühlung mit  $21^{\circ}\text{C}$  definiert wurde. Durch die Definition, dass das Feld KALT für freie Kühlung ausgelegt werden soll, sinkt auch das Leistungspotenzial des Zweifeldspeichers per Definition bei gleicher Gesamtsondenanzahl wie bei Einfeldspeicher, vergleiche Formel in Abbildung 14. Die Dimensionen der Sondenfelder werden bei jedem Szenario so angepasst, dass die gewählten Temperaturlimits in 20 Jahren nicht verletzt werden.

Durch die Definition der Jahresenergiebilanz muss die Zusatzquelle (Solarmodul) so dimensioniert werden, dass diese beim Einfeldspeicher die Bilanz auf  $5\%$  ausgleicht oder Feld WARM bei Zweifeldspeicher etwas überbeladen wird. Bei Feld KALT sollte mehr Energie durch den Heizbetrieb entzogen werden als durch freie Kühlung wieder eingespeist wird. Diese Ziele müssen in der Regelstrategie bei Zweifeldspeicher zusätzlich berücksichtigt werden.



### **2.7.6 Betriebsweise des Zweifeldspeichers**

Für den Betrieb eines Zweifeldspeichers muss eine Regelung implementiert werden, die steuert aus welchem der beiden Felder entnommen bzw. regeneriert wird. In der Praxis wird dies voraussichtlich durch Messung der aktuellen Vor- und Rücklauftemperatur oder, in einer fortgeschrittenen Variante, durch modellprädiktive Regelung erfolgen. Für die Simulation werden Temperaturgrenzwerte für jedes Sondenfeld festgesetzt („Grenztemperatur“), weiters wird eine Reihenfolge der Be- und Entladung der beiden Felder vorgegeben („Feldpriorität“). Wird zum Beispiel die Feldpriorität auf Feld WARM mit Grenztemperatur 5 °C gewählt, so wird so viel Wärme aus dem warmen Feld entzogen, bis die Grenztemperatur unterschritten wird. Dann wird eine Lastverteilung auf beide Felder ermittelt, sodass die Temperaturgrenzwerte eingehalten werden können.

Durch Einstellung der Feldpriorität und Grenztemperatur können somit verschiedene Szenarien simuliert und optimiert werden. Zusätzlich kann die Feldpriorität unterschiedlich für Heiz- und Kühlperiode gelegt werden.

Im Frühjahr/Sommer ist eine prioritäre Entladung von Feld KALT ratsam, da die freie Kühlung das Feld erwärmt, welches mit Hilfe des geringen Sommer-Wärmebedarfs (Warmwasserbedarf) wieder etwas entladen werden kann. Feld WARM wird im Sommer vorwiegend durch das Solarmodul geladen. Liegt die Vorlauftemperatur der Beladung bei 30 °C (Ladezustand Feld WARM = 100 %), so kann die Regelungstechnik auf eine direkte Beladung des Heizungs- und Warmwasserspeichers umschalten (siehe Solarpriorität).

Im Herbst kann eine prioritäre Entladung von Feld WARM Vorteile bringen, da dieses vollgeladen ist und eine Entladung dessen mehr Solarenergieeinspeisung zulässt.

## **3 Rechtliche und technische Rahmenbedingungen für Erdwärmesonden**

Die Rechtsgrundlage für die Nutzung von Erdwärmesonden ist das Wasserrechtsgesetz – WRG 1959. Im Gegensatz zu offenen Geothermiesystemen wie Grundwasserwärmepumpen die einen Einwirkungstatbestand durch die direkte Gewässerbenutzung darstellen, gilt bei Anlagen zur thermischen Nutzung des Untergrunds (Erdwärmesonden, -kollektoren oder Sonderformen) der Vorsorgetatbestand. Eine wasserrechtliche Bewilligung ist hier nur unter gewissen Voraussetzungen nötig. Diese sind laut §31c Abs. 5 WRG 1959:

- a) Anlagen zur Gewinnung von Erdwärme in wasserrechtlich besonders geschützten Gebieten und in geschlossenen Siedlungsgebieten ohne zentrale Trinkwasserversorgung;
- b) Anlagen zur Gewinnung von Erdwärme in Form von Vertikalkollektoren (Tiefsonden), soweit sie nicht von lit. a erfasst sind, sofern sie eine Tiefe von 300m überschreiten oder in Gebieten mit gespannten oder artesisch gespannten Grundwasservorkommen;
- c) Anlagen zur Wärmenutzung der Gewässer.

Sofern eine Bewilligungspflicht vorliegt kann das Anzeigeverfahren nach §114 angewendet werden. Bewilligungen sind dann mit 25 Jahren ab Einbringung der Anzeige befristet.

Bei größeren Anlagen die eine thermische Auswirkung auf das Grundwasser erwarten lassen, muss §32 WRG 1959 berücksichtigt werden. Dort heißt es:

§32. (1) Einwirkungen auf Gewässer, die unmittelbar oder mittelbar deren Beschaffenheit beeinträchtigen, sind nur nach wasserrechtlicher Bewilligung zulässig.

Der für die Errichtung von Erdwärmesondenfelder anwendbare Passus (§32 Abs. 2b) bezieht sich auf Einwirkungen durch Temperaturänderung, wobei Temperaturänderung nicht näher definiert ist. Anlagen die von §32 umfasst werden unterliegen der wasserrechtlichen Bewilligung im Bewilligungsverfahren und können nicht im Anzeigeverfahren behandelt werden.

Unabhängig des Bewilligungsverfahrens muss bei allen Anlagen der Stand der Technik (§12a WRG 1959) eingehalten werden. Der Stand der Technik ist im WRG als der auf einschlägigen wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhende Entwicklungsstand definiert.

Da das Wasserrechtsgesetz für die Regelung und Anwendung von Geothermieanlagen nur die Grundlagen wiedergibt, haben die meisten Bundesländer eigene Regelungen zum Umgang mit Geothermieanlagen. Diese sind meist als Informationsblätter oder Leitfäden mit allgemeine Planungs- und Bewirtschaftungsfragen erhältlich. Für geplante Anlagen sind Auflagenkataloge und Formulare zur Einreichung erhältlich. Angaben und Auflagen, die nicht im Wasserrechtsgesetz genannt sind, sind in diesen regionalen Richtlinien streng genommen rechtlich nicht bindend. Sie stellen aber den gültigen Stand der Technik dar und erfüllen somit die rechtlichen Anforderungen.

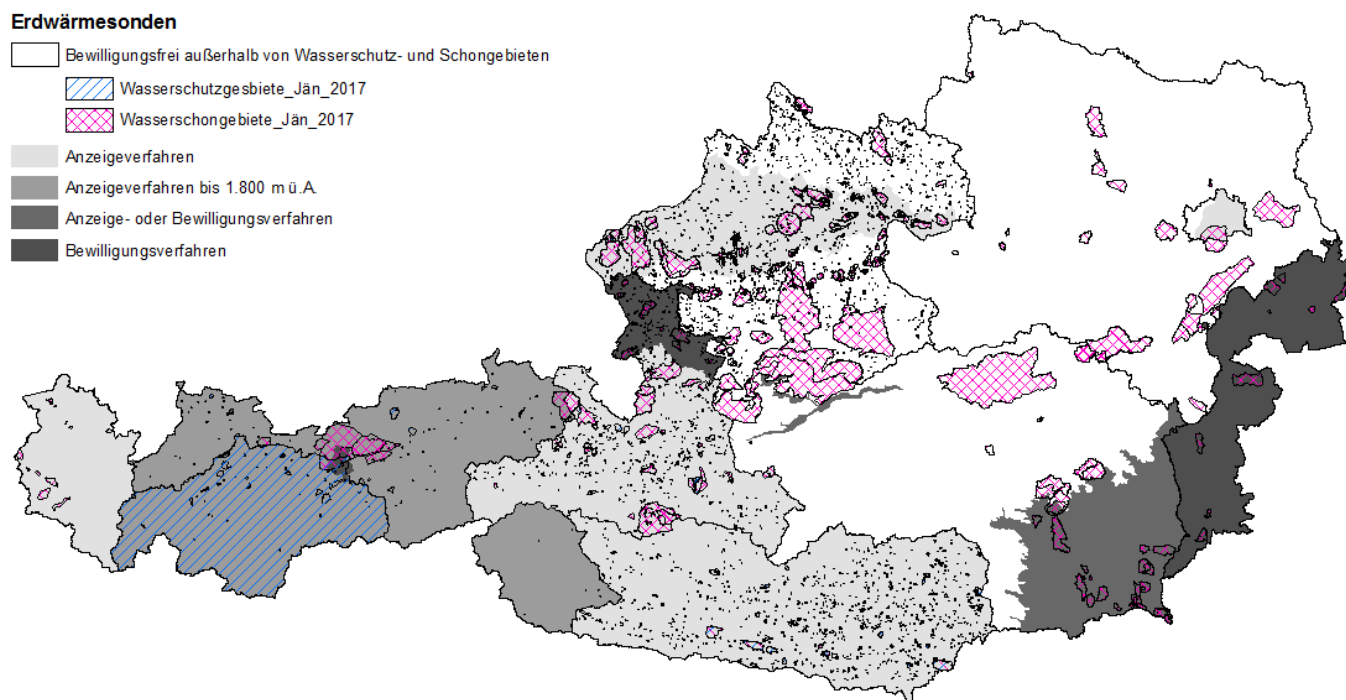
### **3.1 Zur Definition des Stands der Technik**

Das Austrian Standards Institute regelt Normen zur oberflächennahen Geothermienutzung. Diese Normen sind nur rechtsverbindlich, wenn der Gesetzgeber sie erwähnt. Mit Juni 2020 wurde eine ÖNORM EN 17522 zur Planung und Bau von Erdwärmesonden veröffentlicht (Austrian-Standards, 2020).

Auch der ÖWAV (Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband) stellt als Dachverband der Dienstleister in der Wasser- und Abfallwirtschaft entsprechende Richtlinien für die Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds zur Verfügung. Das ÖWAV-Regelblatt 207 – Thermische Nutzung von Grundwasser und Erdreich – Heizen und Kühlen – (2009) ist die wichtigste Richtlinie in Österreich. Die Richtlinie ist rechtlich nicht bindend, wird aber von den Verwaltungsbehörden allgemein als Stand der Technik angesehen.

### **3.2 Einreichverfahren**

Grundsätzlich wird im Wasserrechtsgesetz zwischen Bewilligungsverfahren und Anzeigeverfahren (§114) unterschieden. Die Art der Anlage und der angenommene Einfluss auf das Wasser/Grundwasser entscheidet über das einzusetzende Verfahren. Für die Nutzung von Erdwärmesonden wird dies über die §31c und 32 definiert.



**Abbildung 19: Grafische Darstellung der vorgeschriebenen Einreichverfahren je nach Bundesland und Region in Österreich**

Die Vorgaben in §31c und §32 des WRG 1959 werden je nach Bundesland unterschiedlich ausgelegt. So zeigt sich für Österreich ein diverses Bild bezüglich des benötigten Einreichverfahrens (Abbildung 19, Tabelle 6). So sind z. B. im Burgenland alle Vorhaben, unabhängig ihrer Lage im Bewilligungsverfahren zu behandeln, während in Niederösterreich Anlagen außerhalb von Wasserschutz- und -schongebieten ohne Verfahren errichtet werden können. In allen Bundesländern gleich ist die Notwendigkeit eines Verfahrens innerhalb von Wasserschutz- und Schongebieten. Die Art des Verfahrens, Bewilligungs- oder Anzeigeverfahren, hängt wiederum vom Bundesland ab. Die Bewilligungsdauer bei Anzeigeverfahren ist mit 25 Jahren festgelegt, bei Bewilligungsverfahren auf die längste vertretbare Zeit. Im Wasserrechtsgesetz werden Erdwärmesondenfelder oder thermische Speicher nicht behandelt oder definiert.

Für Erdwärmesondenfelder und thermische Speicher gelten ebenfalls unterschiedliche Regelungen bezüglich des Verfahrens und erforderlichen Angaben in den Bundesländern. Diese sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Die dort beschriebenen Punkte bilden eine einfache erste Übersicht über die Handhabung von Erdwärmesonden, Erdwärmesondenfeldern und Erdwärmespeichern in den einzelnen Bundesländern. Informationen stammen aus über die Bundesländer erhältlichen Informationen, wie Leitfäden oder Formulare zur Einreichung sowie aus persönlichen Gesprächen der Geologischen Bundesanstalt (seit 2023 GeoSphere Austria) mit Mitarbeitern der Landesregierungen (unveröffentlichte Erhebungen im Zuge des Interreg Alpine Space Projekts GRETA).

**Tabelle 6: Übersicht über Einreichverfahren und spezielle Anforderungen für die Einreichung von Erdwärmesonden, Erdwärmesondenfeldern und -speichern in Österreich**

Bundesland	Verfahren bei der Einreichung von Erdwärmesonden	Spezielle Anforderungen bei der Einreichung von Erdwärmesonden	Definition Erdwärmesondenfeld	Verfahren bei der Einreichung von Erdwärmesondenfeldern	Spezielle Anforderungen bei der Einreichung von Erdwärmesondenfeldern	Bestimmungen für die Nutzung als Speicher
Burgenland	Immer im Bewilligungsverfahren	Die erste Bohrung jeder Anlage gilt als Probebohrung und darf nur unter Aufsicht abgeteuft werden; ab 6 Sonden ist ein TRT erforderlich	Keine genaue Definition, je nach Ausführung der Anlage schon ab 6 Sonden als Erdwärmesondenfeld behandelt	Bewilligungsverfahren	TRT gefordert, Probebohrungen je nach Sondenanzahl und -anzahl gefordert; Berechnung mit numerischen Simulationsprogramm (EED oder Ähnliches); Forderung nach thermischer Modellierung noch nicht vorgekommen	Keine Erfahrungen und auch keine Auflagen ausgearbeitet
Kärnten	Immer im Anzeigeverfahren		Anlagen mit 10 oder mehr Sonden	Bewilligungsverfahren	TRT erforderlich (1 Test pro Anlage); Sondenauslegung mit EED oder ähnlichem; thermische Modellierung selten gefordert	Wasserrechtlich noch kein Thema in Kärnten
Niederösterreich	Anzeigeverfahren nur wie in §31c Abs. 5 lit a und c; gespannte und artesisch gespannte Grundwässer sind nicht definiert weshalb in NÖ außerhalb vom Schutz- und Schongebieten keine Meldung bei der Behörde nötig ist		Keine Definition	Nur bewilligungspflichtig, wenn Sondenfelder in großen Grundwasserkörpern liegen; ansonsten Handhabung wie bei Einzelsonden		Einzelfallbegutachtung; nur eine bewilligte Anlage in NÖ bekannt
Oberösterreich	Anzeigeverfahren wie in §31c Abs. 5 gefordert; Gebiete dazu in DORIS ausgewiesen; in Einzelfällen wird das Verfahren in ein Bewilligungsverfahren umgewandelt		Keine offizielle Definition; Praxis: 10 oder mehr Sonden	Anzeigeverfahren; bei direkter Lage im Aquifer Bewilligungsverfahren nach §32	Sondenauslegung mit EED oder ähnlichem; TRT im Normalfall nicht gefordert	Forschungsprojekte bekannt; wasserrechtlich noch kein Thema in OÖ
Salzburg	Anzeigeverfahren, in Einzelfällen auch ein Bewilligungsverfahren möglich		Anlagen mit mehr als 1000 lfm bzw. Anlagen mit Heizleistungen über 30 KW	Anzeigeverfahren	Detailprüfung mit Wärmebilanz; TRT empfohlen – eine Vorabsprache mit der Behörde ist anzuraten;	Keine Erfahrungen und auch keine Auflagen ausgearbeitet
Steiermark	Je nach Lage im Anzeige oder Bewilligungsverfahren; es sind Zonen ausgewiesen die die Auskunft über Verfahren und Auflagen geben; außerhalb dieser Zonen sind Anlagen bewilligungsfrei		10 Bohrungen bzw. mehr als 1000 lfm insgesamt	In der gesamten Steiermark im Bewilligungsverfahren nach §32	Ermittlung der Temperaturfahne unter Heranziehung eines numerischen Wärmetransportmodells notwendig	Keine Erfahrungen; Anlagen jedenfalls bewilligungspflichtig
Tirol	Alle Anlagen bis zu einer Seehöhe von 1.800 m. ü. A. sind im Anzeigeverfahren zu bewilligen; Im Zuständigkeitsbereich des Magistrat Innsbrucks immer im Bewilligungsverfahren					
Vorarlberg	Anzeigeverfahren nach §31c					
Wien	Westlich der Bewilligungsgrenze (zu finden im Wiener Erdwärmekataster) bewilligungsfrei; östlich der Grenze muss ein Anzeigeverfahren durchgeführt werden		Keine offizielle Definition; je nach Ausführung ab 5 Sonden als Sondenfeld klassifiziert	Östlich der Bewilligungsgrenze: Sondenfelder in Bereichen ohne potente Grundwasserkörper im Anzeigeverfahren; Sondenfelder im Bereich von potenten Grundwasserkörpern im Bewilligungsverfahren	Eine hydraulisch-thermische Simulation muss durchgeführt werden	

### **3.3 Stand der Technik**

In allen Bundesländern wird das ÖWAV Regelblatt 207 (2009) als Stand der Technik angegeben. Durch die Nennung des Stands der Technik durch die Behörde, kann die Einhaltung der im ÖWAV RB 207 angegebenen Regeln als rechtlich bindend angesehen werden. Bei Abweichungen hat der Antragsteller jedenfalls die Verpflichtung nachzuweisen, dass die gewählten Maßnahmen den festgelegten Stand der Technik einhalten bzw. überschreiten.

### **3.4 Auflagen**

Auflagenkataloge sind für Erdwärmesonden unabhängig des Einreichverfahrens in allen Bundesländern, mit Ausnahme des Burgenlandes gleich. Im Falle eines Anzeigeverfahrens sind diese selbstverpflichtend auszuführen, bei Bewilligungsverfahren sind sie verpflichtend und können geprüft werden. Im Burgenland werden alle Anlagen als Einzelfall betrachtet und die Auflagen an die jeweilige Situation angepasst.

### **3.5 Spezielle technische Parameter**

Im Nachfolgenden werden drei für die Dimensionierung und Positionierung von Speicherfeldern relevante Parameter genauer betrachtet. Die Angaben beruhen auf den verwendeten Normen, auf den Bundesländer-Leitfäden und Einreichformularen sowie auf persönlicher Kommunikation.

Die Angaben zu den ausgewählten Parametern wurden für Nutzungen von Einfamilienhäusern oder kleineren Sondenfeldern formuliert. Die Umsetzung von größeren Sondenfeldern mit Speicherbetrieb wird nicht erwähnt.

#### **3.5.1 Ein- und Austrittstemperaturen des Wärmeträgermediums**

Die erlaubten Ein- und Austrittstemperaturen des Wärmeträgermediums sowohl für Heiz- als auch Kühlbetrieb sind entscheidend für den Betrieb eines Erdsondenfeldes welches auch als Speicher verwendet wird. Die gegenwärtigen Bestimmungen in Österreich im Vergleich mit Deutschland und der Schweiz sind in Tabelle 7 und Tabelle 8 zusammengefasst.

**Tabelle 7: Empfohlene Limits der Mitteltemperatur des Wärmeträgermediums für Heiz- und Kühlbetrieb in Normen im DACH Raum**

Regelwerk	Heizbetrieb Mittlere T des Wärmeträgermediums im Gleichgewichtszustand (nach 5-50 a)	Kühlbetrieb Mittlere T des Wärmeträgermediums im Gleichgewichtszustand (nach 5-50 a)
ÖWAV RB 207 (2009)	$\geq -1,5^\circ \text{ C}$ (Bsp. bei Eintrittstemperatur $-3^\circ \text{ C}$ ; Austrittstemperatur $0^\circ \text{ C}$ )	$\leq 30^\circ \text{ C}$
ÖNORM EN 17522 VDI 4640 (2020)	Kein Angabe Eintrittstemperatur soll im Monatsmittel $0^\circ \text{ C}$ nicht unterschreiten; Bei Spitzenlast sollen $-5^\circ \text{ C}$ nicht unterschritten werden	Keine Angabe Eintrittstemperatur darf im Monatsmittel die über die Sondentiefe gemittelte Temperatur um maximal 15K überschreiten, Spitzenlast: 20K
SIA 384/6 (2010)	$\geq -1,5^\circ \text{ C}$ (Bsp. bei Eintrittstemperatur $-3^\circ \text{ C}$ ; Austrittstemperatur $0^\circ \text{ C}$ )	Für den Wärmeeintrag gilt eine maximale Wärmeträgertemperatur in Abhängigkeit vom eingesetzten Sonden- und Hinterfüllungsmaterial sowie allfälliger behördlicher Vorschriften

**Tabelle 8: Empfohlene Limits der Mitteltemperatur des Wärmeträgermediums für Heiz- und Kühlbetrieb in den Bundesländern**

Bundesland	Ein- und Austrittstemperatur des Wärmeträgermediums
Burgendland	Wie ÖWAV RB 207, wird kontrolliert
Kärnten	Für technische Details gelten die Anforderungen des ÖWAV RB 207
Niederösterreich	Wie ÖWAV RB 207
Oberösterreich	Wie ÖWAV RB 207
Salzburg	Mittlere Temperatur des Wärmeentzugmediums darf nach Einstellen des Gleichgewichts $-1,5^\circ \text{ C}$ nicht unterschreiten (im Auflagenkatalog)
Steiermark	Soletemperaturgrenzen werden weder vorgegeben noch geprüft
Tirol	Austrittstemperatur der Sole an der Wärmepumpe darf $-3^\circ \text{ C}$ nicht unterschreiten
Vorarlberg	
Wien	ÖWAV RB 207 als Stand der Technik genannt, Parameter nicht in den Auflagen erwähnt, strenge Einhaltung dieser Parameter durch die Behörde gefordert

### 3.5.2 Abstand zwischen Erdwärmesonden

Der Abstand zwischen Erdwärmesonden einer Anlage ist in keiner rechtlichen oder technischen Richtlinie vorgegeben. Im ÖWAV RB207 (2009) wird angegeben, dass der Wärmeentzug durch Erdwärmesonden hauptsächlich in einem Radius von 10 Metern um die Sonde erfolgt. Je geringer der Sondenabstand gewählt wird, desto größer ist die gegenseitige thermische Beeinträchtigungen zwischen den einzelnen Sonden.

In den Bundesländern (Tabelle 10) werden unterschiedliche Empfehlungen für den Abstand zwischen Sonden einer Anlage gegeben. In keinem Bundesland gilt eine Unterschreitung als Ablehnungsgrund der Anlage, kann jedoch als Argument für eine Neudimensionierung verwendet werden. Die Empfehlung zur Einhaltung und gegebenenfalls Neudimensionierung beruht auf der Erhöhung der Energieeffizienz und Einsparung von Bohrmeter (vorausgesetzt genügend Platz ist vorhanden).

**Tabelle 9: Empfohlener Abstand zwischen einzelnen Erdwärmesonden einer Anlage in Normen im DACH Raum**

Regelwerk	Abstand zwischen Erdwärmesonden einer Anlage
ÖWAV RB 207	Keine Angabe, es wird jedoch erwähnt, dass der Wärmeentzug in einem Radius von 10 m um die Sonde stattfindet
ÖNORM EN 17522	Keine Angabe
VDI 4640	Blatt 2: mind. 6 m Sondenabstand bei Anlagen bis 30 kW
SIA 384/6	Mindestens 5 m bei vertikalen Bohrungen aus bohrtechnischen Gründen; je nach Betriebsweise der Anlage wird vorgeschrieben den Sondenabstand dementsprechend energetisch zu optimieren

**Tabelle 10: Empfohlener Abstand zwischen einzelnen Erdwärmesonden einer Anlage in den Bundesländern**

Bundesland	Abstand zwischen Erdwärmesonden einer Anlage
Burgendland	Keine Information vorhanden, im Burgenland vieles eine Einzelfallentscheidung
Kärnten	Empfehlung 8 m
Niederösterreich	Wie ÖWAV RB 207
Oberösterreich	Zu benachbarten Sonden sollte ein Abstand von 25 bis 30 m eingehalten werden, Abstände kleiner als 10 m in der eigenen Anlage sind bei der Bemessung zu berücksichtigen
Salzburg	7 bis 10 m als Empfehlung
Steiermark	
Tirol	
Vorarlberg	
Wien	Empfehlung 8 m

### 3.5.3 Abstand zur Grundstücksgrenze

Der Abstand zur Grundstücksgrenze soll eine negative Beeinflussung von Nachbarn ausschließen und sicherstellen, dass auch diese die Möglichkeit haben eine Erdwärmesondenanlage ohne nachteilige Beeinflussungen zu betreiben. Abgeleitet von den Angaben von 10 m Mindestabstand zwischen 2 Sonden (ÖWAV RB 207, siehe vorangegangener Abschnitt) sollte ein Mindestabstand von 5 m zur Grundstücksgrenze als ausreichend erscheinen. Die Vorgaben in den Bundesländern liegen ohne Angabe von Gründen zwischen 2,5 (Empfehlung ÖWAV RB 207) und 5 Meter.

**Tabelle 11: Angaben zum Abstand von Erdwärmesonden zur Grundstücksgrenze in Normen im DACH Raum**

Regelwerk	Abstand zur Grundstücksgrenze
ÖWAV RB 207	Mindestens 2,5 m ohne Angabe von Gründen
ÖNORM EN 17522	Keine Angabe
VDI 4640	Blatt1: Mindestabstand 10 m (da bei diesem Abstand keine Beeinträchtigungen durch die Sonden zu erwarten sind) oder nach Absprache mit Nachbarn (gilt auch als Abstand zwischen 2 Anlagen)
SIA 384/6	Keine Angabe, es wird auf Berücksichtigung von benachbarten Sonden hingewiesen und dass die Festlegung von Grenzabständen zu Nachbargrundstücken Sache der Bewilligungsbehörden ist

**Tabelle 12: Angaben zum Abstand von Erdwärmesonden zur Grundstücksgrenze in Normen in den Bundesländern**

Bundesland	Abstand zur Grundstücksgrenze
Burgendland	Keine Information vorhanden, im Burgenland vieles eine Einzelfallentscheidung
Kärnten	
Niederösterreich	Wie ÖWAV RB 207
Oberösterreich	
Salzburg	5 m, muss eingehalten werden
Steiermark	2,5 m
Tirol	Je 10 m Tiefe müssen 0,5 m Abstand eingehalten werden (oder Absprache mit Nachbarn), mindestens jedoch 2,5 m
Vorarlberg	4 m
Wien	Mindestens 2,5 m



### 3.6 Limitierung der Tiefe

Für eine rein wasserrechtliche Einreichung ist die Tiefe von Erdwärmesonden generell mit 300 m begrenzt. Tiefere Sonden sind zusätzlich über das Mineralrohstoffgesetz (MinroG) geregelt. Wobei letzteres die Errichtung regelt, die Regelung der Nutzung jedoch im Bereich des Wasserrechts verbleibt.

In Österreich zeigt sich jedoch auch, dass die Bewilligung von Sonden in einigen Regionen an eine Maximallänge der Sonde gebunden ist. Dies trifft vor allem in Regionen mit gespanntem oder artesisch gespanntem Grundwasser im Burgenland, Oberösterreich und der Steiermark zu. Die vorgegebene Maximaltiefe der Sonden ist je nach Gebiet unterschiedlich und wird von der Behörde ausgegeben.

### 3.7 Weiterführende Literatur und Links

- Österreichisches Wasserrechtsgesetz 1959, in der Fassung vom 01.09.2021
- Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (2009): ÖWAV Regelblatt 207: Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds – Heizen und Kühlen, 2. Auflage
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (2021): SIA 384/6:2021 Erdwärmesonden, Schweizer Norm, 1. Auflage
- Verein Deutscher Ingenieure (2010): VDI 4640 Blatt 1, Thermische Nutzung des Untergrunds – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte, VDI-Richtlinien
- Verein Deutscher Ingenieure (2019): VDI 4640 Blatt 2, Thermische Nutzung des Untergrunds – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, VDI-Richtlinien
- Verein Deutscher Ingenieure (2001): VDI 4640 Blatt 3, Thermische Nutzung des Untergrunds – Unterirdische Thermische Energiespeicher, VDI-Richtlinien
- **BURGENLAND:** Wasserportal Burgenland: Eignungskarte für Wärmepumpen mit Tiefsonden [Wärmepumpen-Tiefsonden - Wasserportal Burgenland \(bgld.gv.at\)](https://www.burgenland.gv.at/wasserportal/burgenland/waerme-tiefsonden) (Erhebung August 2022)
- **KÄRNTEN:** <https://www.ktn.gv.at/Themen-AZ/Details?thema=11&subthema=54&detail=980>
- **NIEDERÖSTERREICH:** Amt der NÖ Landesregierung, Gruppe Wasser (2012): Wärmepumpen und Grundwasserschutz, Planung, Bau und Betrieb, Neuauflage 2012 [https://www.noel.gv.at/noel/Wasser/grundwasser\\_waerme.html](https://www.noel.gv.at/noel/Wasser/grundwasser_waerme.html)
- **OBERÖSTERREICH:** Amt der OÖ Landesregierung (2021): Merkblatt Erdwärmesonden (Tiefsonden) <https://www.land-oberoesterreich.gv.at/165507.htm>
- **SALZBURG:** Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 14 (2022): Strategiepapier Erdwärme 2.0. Land Salzburg, Abteilung 7 (2017): Leitfaden Erdwärmesonden (Tiefsonden) – Errichtung und Betrieb
- **Steiermark**
- **TIROL:** Amt der Tiroler Landesregierung (2016): Leitfaden zum Bau und Betrieb von Erdwärmesonden in Tirol
- **VORARLBERG:** <https://vorarlberg.at/-/erdwaerme-mittels-erdsonden-formulare> (Erhebung August 2022)
- **WIEN:** Magistrat der Stadt Wien, Abteilung 20 (2014): Wärme!pumpen zur energieeffizienten Wärmeversorgung – Technologieleitfaden Wärmepumpen <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/energie/themenstadtplan/erdwaerme/>  
<https://www.erdwaerme-wien.info/>

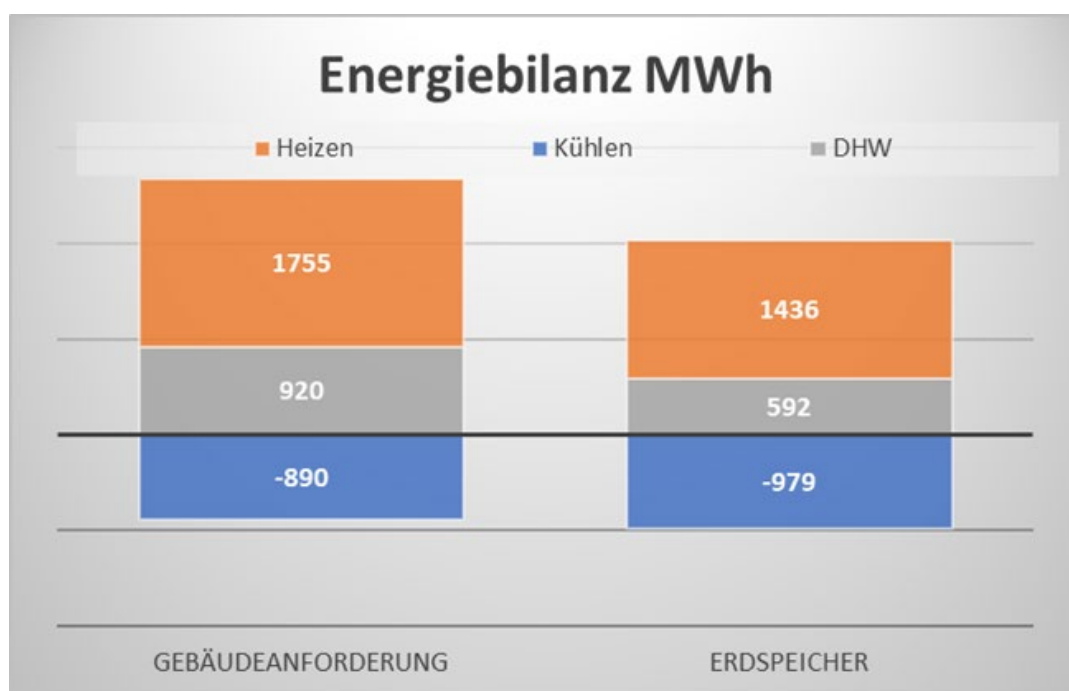
## **4 Gesamtsimulation, Dimensionierung und Szenarienmodellierung**

### **4.1 Dimensionierungen**

#### **4.1.1 Jahresenergiebilanz des Gebäudebedarfs und des Erdspeichers**

Die Jahressumme des Wärme- und Kältebedarfs des gewählten Gebäudequartiers (Kapitel 2.2), ergibt im Verhältnis 3:1, d. h. die Gebäude benötigen über das Jahr gesehen dreimal so viel Wärme als sie im Sommer durch Kühlung abgeben. Mit Berücksichtigung der Leistungszahl der Wärmepumpe ergibt die Jahresenergiebilanz im Erdspeicher 2,2:1, siehe Abbildung 20. Für den Einfeldspeicher wird also eine saisonale Wärmequelle benötigt, welche ungefähr 1000 MWh pro Jahr liefern muss um den Einfeldspeicher wieder voll aufzuladen (vollständige Regeneration, ausgeglichene Jahresenergiebilanz). Die Erstausslegung des Zweifeldspeichers erfolgte nach der folgenden Überlegung: Um das Problem der Gleichzeitigkeit bei Kühlung und Regeneration zu umgehen, soll der gesamte Kühlbedarf des Gebäudes (890 MWh) aus dem kalten Feld gedeckt werden, während das warme Feld von der saisonalen Zusatzquelle regeneriert wird. In der Heizsaison muss dem kalten Feld die durch Gebäudekühlung eingebrachte Wärme wieder entzogen werden. Der Rest des Wärmebedarfs (in diesem Fall ca. 1100 MWh) wird aus dem warmen Feld entnommen. Dabei sollte besonders in den ersten Jahren des Betriebs eine Über- bzw. Unterbilanzierung der beiden Teilfelder erfolgen um die Temperaturniveaus entsprechend zu heben bzw. zu senken.

Diese erste Betrachtung verwendet eine konstante Leistungszahl der Wärmepumpen und gibt einen Überblick. Erst mit der Gesamtsimulation in PYG wird die Abhängigkeit der Wärmepumpenleistung und dessen Strombedarf von der Quelltemperatur (Vorlauftemperatur des Erdspeichers) sowie der Anteil an freier und erzwungener Kühlung berücksichtigt, siehe Wärmepumpenmodell Kapitel 2.7.



**Abbildung 20 Jahresenergiebilanz der Gebäudeanforderung und des Erdspeichers unter Annahme einer Leistungszahl der Wärmepumpe. Die Bilanz Heizen:Kühlen beträgt bezogen auf den Gebäudebedarf 3:1, bezogen auf den Erdspeicher unter Berücksichtigung der Leistungszahl 2,2:1.**

#### 4.1.2 Dimensionierung der Wärmepumpen und der Pufferspeicher

Die Dimensionierung der Wärmepumpen und Pufferspeicher wird auf den gewählten Gebäudebedarf ausgelegt, dessen stündliches Jahresprofil fest vorgegeben ist. Zuerst wird die Booster-Wärmepumpe für die Brauchwassererzeugung dimensioniert. Diese ist auf einen festen Betriebspunkt eingestellt, da diese aus dem Heizungspuffer HTBUF mit 35 °C entnimmt und in den Brauchwasserpuffer DHWBUF mit 60 °C einspeist und mit 45 °C entnimmt. Die Leistungszahl liegt somit konstant bei 4,5. Mit einem Gesamtvolumen des DHWBUF von 20 m<sup>3</sup>, kann die Wärmepumpe auf 180 kW für den Betriebspunkt W35/W60 ausgelegt werden, d. h. der leere Puffer wäre, ohne Entnahme, in knapp 2 h voll beladen.

Die Booster-Wärmepumpe entnimmt im Betrieb folglich 140 kW aus dem Heizungspuffer. Das stündliche Entnahmeprofil der Booster-Wärmepumpe aus den Heizungspuffer muss zum Profil des Heizungsbedarfs hinzuaddiert werden und ergibt das stündliche Jahresprofil in Abbildung 21. Die Wärmepumpe für den Heizungsspeicher wurde auf eine Gesamtleistung von 1000 kW beim Betriebspunkt S0/W35 mit einem 90 m<sup>3</sup> Pufferspeicher ausgelegt. Die Heizungs-Wärmepumpe HTHP ist in der Simulation auf fünf Stufen mit 200 kW aufgeteilt, die entweder aus dem warmen oder dem kalten Erdsondenfeld entnehmen können. Es ist Aufgabe der Regelstrategie, die Wärmepumpe je nach aktuellem Ladezustand der Erdsondenspeicher und dem aktuellen Solarertrag ein- und auszuschalten. Zudem variiert der Betriebspunkt der Heizungswärmepumpe mit der Erdsondtemperatur (bzw. Ladezustand des Erdsondenspeichers). Die Simulation berücksichtigt diesen Effekt und berechnet die Leistungszahl (bzw. den Stromverbrauch) und die abgegebene Wärmeleistung auf der warmen Seite für jede Betriebsstunde aktuell. Die festen Dimensionierungsparameter sind in Tabelle 13 zusammengefasst und sind bei den folgenden Simulationen sowohl für Einfeld- als auch für die Zweifeldspeicherszenarien gleich groß.

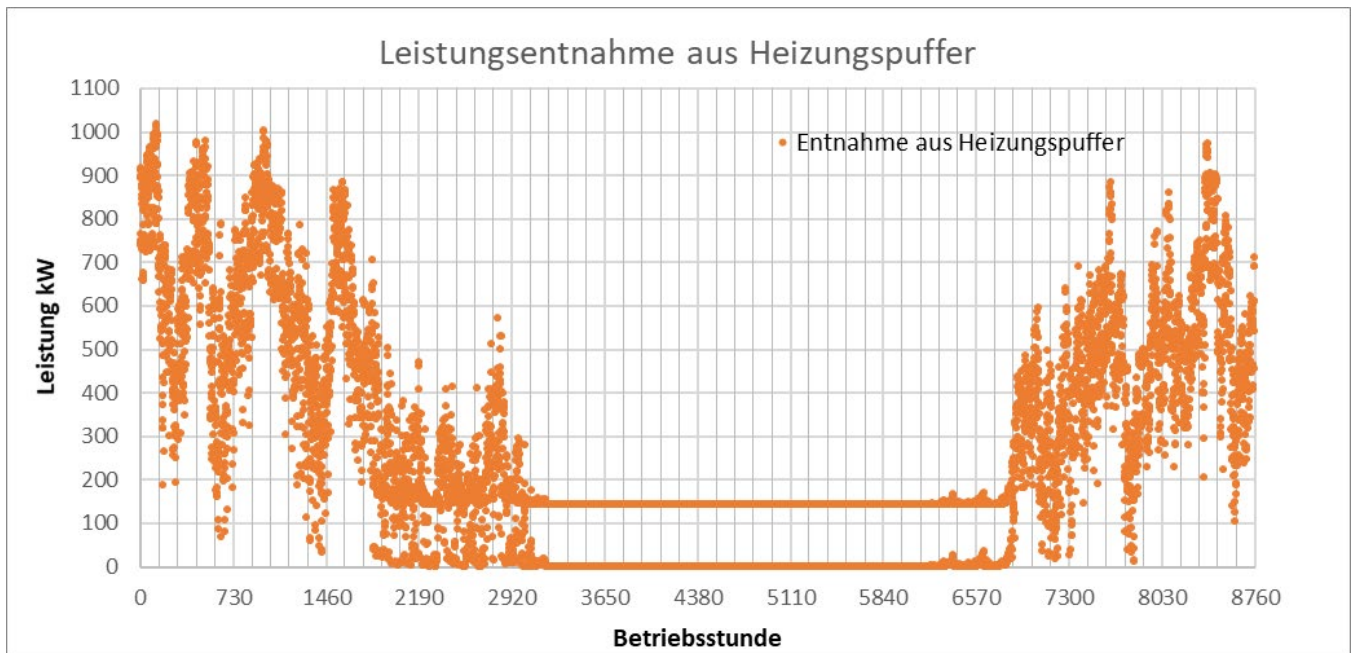


Abbildung 21: Leistungsentnahme aus dem Heizungspuffer

Tabelle 13: Dimensionierungsparameter der Wärmepumpen und der Pufferspeicher

HT	DHW	
$\vartheta_o = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\vartheta_o = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	Speichertemperatur Oben
$\vartheta_U = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\vartheta_U = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$	Speichertemperatur Unten
$\Delta\vartheta = 10\text{ K}$	$\Delta\vartheta = 15\text{ K}$	Temperaturspreizung
$Q_{HT} = 1000\text{ kW}$	$Q_{DHW} = 180\text{ kW}$	Maximale Ladeleistung der Wärmepumpe(n)
$S_{HT} = 90\text{ m}^3$	$S_{DHW} = 20\text{ m}^3$	Speichervolumen
$c_{HT} = 1050\text{ kWh}$	$c_{DHW} = 350\text{ kWh}$	Speicherkapazität
$t_{charge} = 1,05\text{ h}$	$t_{charge} = 1,94\text{ h}$	Dauer Vollladung mit Maximalleistung

#### 4.1.3 Dimensionierung des Solarmoduls und Solarpriorität

Die Dimensionierung des Solarmoduls hängt davon ab, welche Solarpriorität in der Simulation verwendet wird. Je höher die Temperatur mit der das Solarmodul betrieben wird, desto höher sind die Verlustleistungen zur Umgebung und desto niedriger ist der energetische Jahresertrag. Die Dimension der Wärmequelle „Solarmodul“ wird für jedes Szenario individuell bei der Szenarienmodellierung iterativ ausgewählt.

#### 4.1.4 Dimensionierung der Erdsondenspeicher

Die Dimensionierung der Erdsondenspeicher wird ebenso interaktiv im Zuge der Szenarienmodellierung, individuell für jedes Einfeld- und Zweifeld-Szenario, durchgeführt. Je nachdem, wie groß die Dimension des Solarmoduls und die Betriebsstrategie gewählt wurde (Solarpriorität, Feldpriorität bei Zweifeldspeicher) wurde die Sondenfeldgröße (Sondenanzahl und Tiefe) iterativ so gewählt, dass die Dimensionierungsziele (Kapitel 2.7.5) eingehalten werden. Das bedeutet, dass die Vorlauftemperaturen und die Bilanzen die gewählten Grenzwerte nicht über- bzw. unterschreiten dürfen. Eine geringfügige Überschreitung für wenige Stunden pro Jahr kann aber toleriert werden. Können die Grenzwerte durch die Variation der Solarkollektorfläche, der Temperaturlimits des Wärmeentzugs und der Überladung des Heizungspuffers nicht eingehalten werden, müssen die Sondenfelder größer dimensioniert werden. In der Optimierungsphase wurden die geeigneten Varianten unter Berücksichtigung des Stromverbrauchs und der freien Kühlung weiterentwickelt.

## 4.2 Funktionsweise der Gesamtsimulation

Die Gesamtsimulation berücksichtigt den Gebäudebedarf für Heizen und Kühlen, den Solarertrag in Abhängigkeit der Beladetemperatur, den Ladezustand der Pufferspeicher und davon abhängig die Aktivierung der Wärmepumpen, die Abhängigkeit der Wärmepumpenleistung von der Quelltemperatur der Erdspeicher und den Ladezustand der Erdspeicher bei freier oder forcierter Kühlung.

Abbildung 22 zeigt als Beispiel einen ausgewählten Zeitschritt einer Simulation mit einem Zweifeldspeicher im Winter. Der Gebäudebedarf an Warmwasser liegt hier bei 160 kW. Der Ladestand des Brauchwasserpuffers (DHWBUF) liegt unter 50 %, weshalb die Booster-Wärmepumpe aktiviert wird. Diese benötigt ca. 40 kW elektrische Leistung und 140 kW thermische Leistung, die sie aus dem Heizungspuffer (HTBUF) bei 35 °C bezieht. Zusätzlich kommen 600 kW Heizbedarf der Gebäude hinzu. Nun folgt eine Prüfung des maximalen Leistungspotentials der beiden Erdsondenfelder bis zur minimalen Vorlauftemperatur (-3°C) bzw. bis zur Grenztemperatur der eingestellten Feldpriorität. Konkret wurde in dieser Simulation die Feldpriorität WARM bis zu einer Grenztemperatur von 2 °C gewählt. Gleichzeitig liefert das Solarmodul auf aktuellem Temperaturniveau von Feld WARM 91 kW in den Anergiepuffer von Feld WARM. Die Regelstrategie schaltet daraufhin zwei Wärmepumpen auf den Anergiepuffer von Feld WARM und eine Wärmepumpe auf den Anergiepuffer von Feld KALT. Die Bohrlochwandtemperatur der Sonden in Feld WARM ist mit 7,5 °C schon kälter als die 10 °C von Feld KALT. Durch die festgelegte Feldpriorität wird Feld WARM mit 294 kW belastet und Feld KALT mit 212 kW. Die Vorlauftemperaturen sinken auf 3,6 °C und 7,2 °C, d. h. die Wärmepumpenleistung liegt bei 1 x 258 kW aus Feld KALT plus 2 x 237 kW aus Feld WARM. Der Heizungspuffer wird etwas weiter entladen, da der Ladezustand zuvor über 50 % lag.

Abbildung 23 stellt das Gleichzeitigkeitsproblem der Solareinspeisung und Gebäudekühlung im Sommer beim Einfeldspeicher und Zweifeldspeicher im Vergleich dar. Bei der Gebäudekühlung wird Wärme vom Gebäude in den Anergiepuffer abgegeben. Beim Einfeldspeicher summiert sich die Kühlleistung und die Solarleistung im Anergiepuffer und muss vom Erdsondenfeld aufgenommen werden. Bis zu einer Vorlauftemperatur von 21 °C (Rücklauf < 18°C) kann das Gebäude ohne Kältemaschine gekühlt werden (freie Kühlung, blauer Pfeil) und das Erdsondenfeld wird beladen. Bei hohem Ladezustand des

Erdsondenfeldes oder bei hoher Ladeleistung wird die Gebäudekühlung über die Wärmepumpe entweder mit 30 °C in das Erdsondenfeld oder mit höherer Temperatur in den Heizungspuffer gespeist (erzwungene Kühlung). Sind alle Speicher vollgeladen, muss das Solarmodul temporär deaktiviert werden. Beim Zweifeldspeicher wird die Wärme der Gebäudekühlung grundsätzlich über Anergiepuffer/Feld KALT (ANBUF\_c, BHE Field COLD) abgegeben, allerdings ist Feld KALT auch kleiner dimensioniert als bei Einfeldspeicher und somit auch schneller beladen. Gleichzeitig kann das Solarmodul in Feld WARM einspeichern.

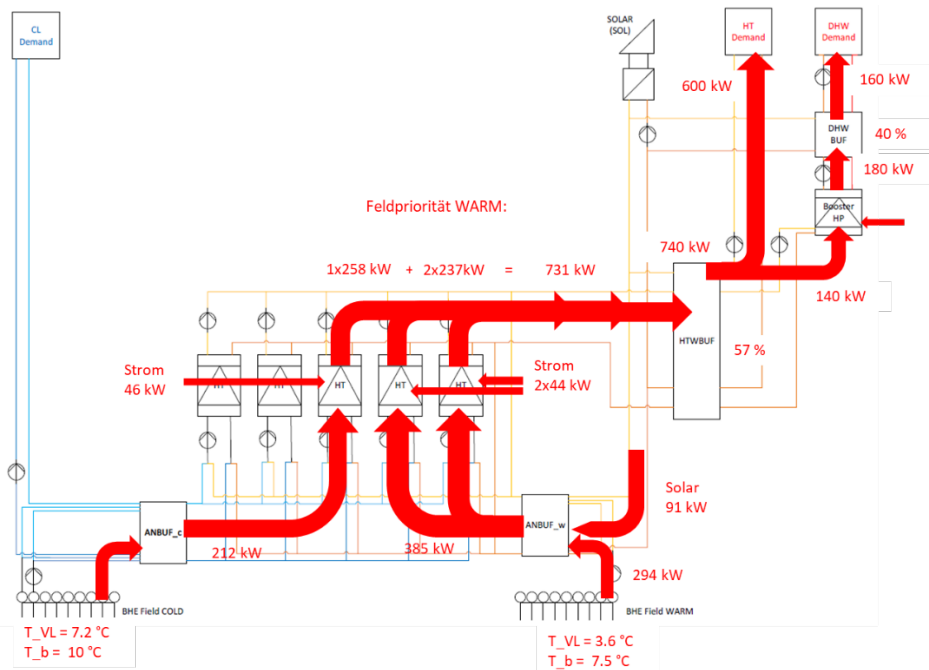


Abbildung 22: Energiefluss eines ausgewählten Zeitschrittes einer Gesamtsimulation im Winter als Beispiel

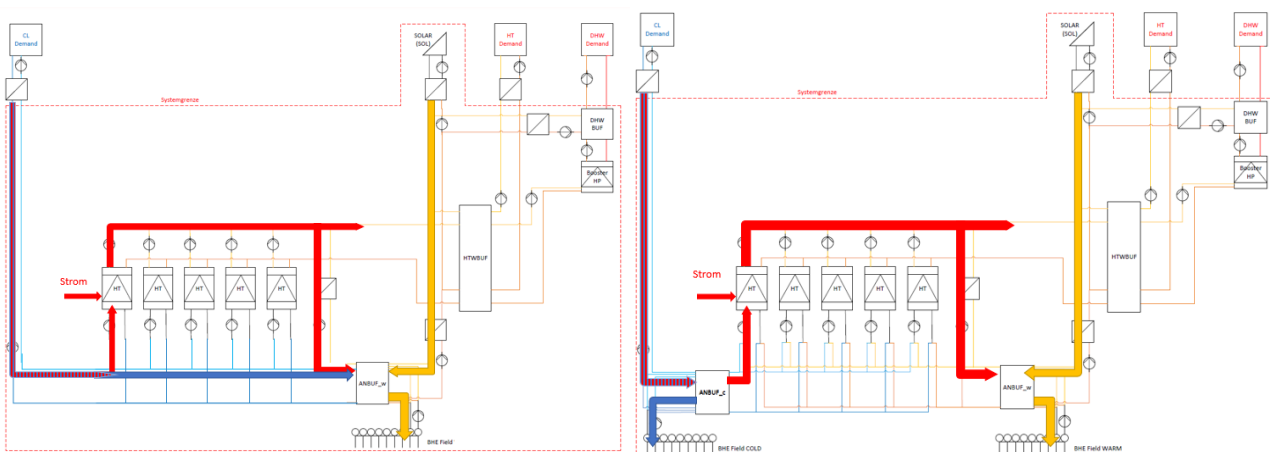


Abbildung 23: Gleichzeitig Kühlen und Solareinspeisung beim Einfeldspeicher (links) und Zweifeldspeicher (rechts). Energiefluss der Solareinspeisung (gelb), freien Kühlung (blau) und forcierten Kühlung (rot) mit Pfeilen hervorgehoben.

## 4.3 Szenarienmodellierung

Mithilfe der Szenarienmodellierung werden ökonomische und ökologische KPIs (Key Performance Indicators) für die Wirtschaftlichkeitsanalyse erhoben. Um die bestmöglichen Varianten zu finden, werden verschiedene Betriebsszenarien simuliert, für die Erdwärmesondenfelder und Solarmodul dimensioniert werden. Als Output ergeben die Simulationen unter anderem die Vor- und Rücklauftemperaturen, den Wirkungsgrad der Wärmepumpen (COP) und die Leistungsdaten der Sondenfelder, alles als Zeitreihen auf Stundenbasis für 20 Jahre.

Für die Modellierung wurde ein für das österreichische Klima charakteristisches Bedarfsszenario mit Wärmebedarfsüberschuss (siehe Kapitel 2) gewählt. Im Zuge der Szenarienmodellierung werden vier Betriebsstrategien des Zweifeldspeichers und zwei Betriebsweisen der konventionellen Einfeldspeicher als Referenzfall untersucht, um den Einfluss verschiedener Umschaltpunkte der Regelstrategie zu beleuchten und die Einbindung von zusätzlichen Wärmequellen (Solarthermie) zu beurteilen. Die Ergebnisse der Szenarienmodellierung werden in der Wirtschaftlichkeitsanalyse (siehe Kapitel 5) gegenübergestellt und bewertet.

### 4.3.1 Parameterstudie

Als erster Schritt der Szenarienmodellierung wurde eine Parameterstudie durchgeführt, um die Auswirkungen der verschiedenen Eingangsparameter auf das System zu erkennen. Eine Erläuterung der verschiedenen Parameter ist Kapitel 2 Systemdefinition und Randbedingungen zu entnehmen. Während der Parameterstudie wurden die folgenden Parameter variiert:

Einfeldspeicher

- Sondenfeldgröße
- Solarkollektorfläche
- Feld- und Solarpriorität

Zweifeldspeicher

- Sondenfeldgröße
- Solarkollektorfläche
- Feld- und Solarpriorität
- Grenztemperatur des warmen und des kalten Felds

Der Fokus liegt auf der Minimierung des Stromverbrauchs der Wärmepumpen und Maximierung der freien Kühlung. Der Gesamtstromverbrauch der Wärmepumpen umfasst den Stromverbrauch der Heizung und der forcierten Kühlung. Der Stromverbrauch der Umwälzpumpen wurde erst später in der Wirtschaftlichkeitsberechnung berücksichtigt. Der Verlauf des Stromverbrauchs in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern ist in Abbildung 24 bis Abbildung 26 dargestellt.

#### **Sondenfeldgröße**

Wie zu erwarten, reduziert sich der Stromverbrauch durch die höhere Sondenanzahl sowohl bei der Einfeld- als auch bei der Zweifeldlösung.

#### **Solarkollektorfläche**

Die Vergrößerung der Solarkollektorfläche führt zu höherem Ertrag an Solarenergie, folglich wird das Temperaturniveau des warmen Speichers weiter erhöht. Das wirkt sich einerseits positiv auf die Effizienz

im Heizfall aus. Auf der anderen Seite erhöht sich damit der Stromverbrauch der forcierten Kühlung. Die Entwicklung des Gesamtstromverbrauchs wird durch das Verhältnis der Veränderungen dieser beiden Komponenten bestimmt.

Wird bei der **Einfeldlösung** die Solarenergie prioritär zur Regeneration der Felder verwendet („High Energy“), führt die Erhöhung der Kollektorfläche zunächst zu einer Erhöhung des Gesamtstromverbrauchs, die negative Beeinflussung im Sommer auf die Kühlung überwiegt. Erst ab einer gewissen Solarkollektorfläche – in diesem Fall ca. 1400 m<sup>2</sup> überwiegt die steigende Effizienz während der Heizsaison und der Gesamtstrombedarf sinkt mit steigender Kollektorfläche (vgl. Abbildung 25).

Anders verhält es sich, wenn die Solarwärme prioritär für die direkte Wärmenutzung verwendet wird („High Exergy“). Bei kleinen Solarflächen wirkt sich eine Steigerung der Fläche positiv auf den Stromverbrauch der Heizung aus, ab etwa 1400 m<sup>2</sup> übersteigt der höhere Stromverbrauch durch mehr forcierte Kühlung die Ersparnis in der Heizsaison, der Gesamtstromverbrauch steigt mit größerer Solarfläche. Daher zeigen die Kurven für die Einfeldspeicher-Varianten in Abbildung 25 lokale Extremwerte bei etwa 1300 m<sup>2</sup> Kollektorfläche.

Beim **Zweifeldspeicher** hingegen sinkt der Gesamtstromverbrauch stetig mit Vergrößerung der Solarkollektorfläche.

---

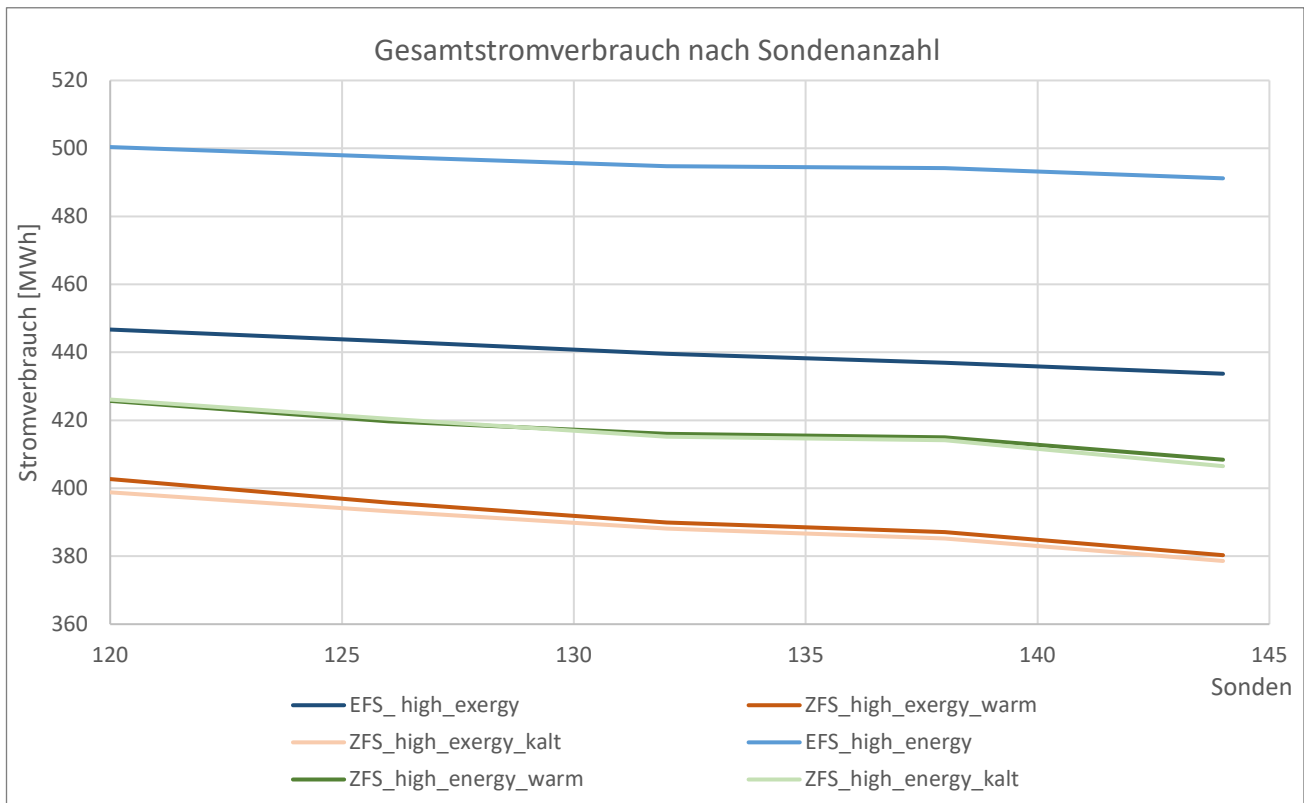
*Damit ist bestätigt, dass sich eine zusätzliche saisonale Wärmequelle als Bilanzausgleich negativ auf die Kühleffizienz und sogar die Gesamteffizienz eines Erdsondenspeichers auswirken kann. Durch die Umsetzung eines Zweifeldspeichers durch Trennung des Speichers in zwei Bereiche kann dieses Problem der Gleichzeitigkeit tatsächlich behoben werden. Die optimale Auslegung der einzelnen Anlagenkomponenten ist dabei vom Bedarfsprofil (Wärmemengen und Temperaturanforderung) abhängig.*

---

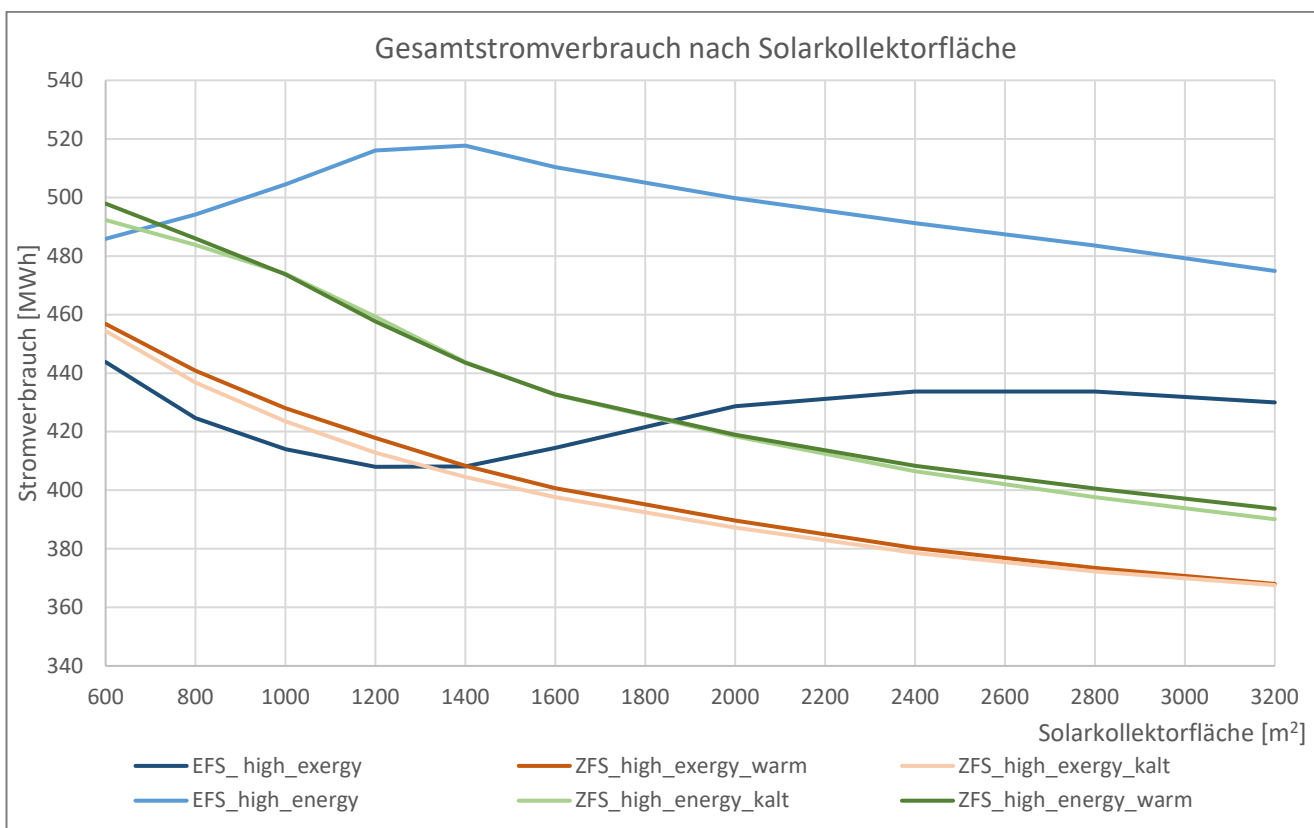
### **Temperaturlimit des Wärmeentzugs**

Die Erhöhung des Temperaturlimits des Wärmeentzugs aus dem warmen Feld führt zu einem geringeren Gesamtstromverbrauch, da das höhere Temperaturlimit im warmen Feld eine stärkere Abkühlung des kalten Feldes ergibt und dadurch mehr freie Kühlung aus dem kalten Feld ermöglicht. Bei einem vorrangigen Wärmeentzug aus dem kalten Feld wirkt auch dieser Effekt. Durch die Reduktion des Temperaturlimits im kalten Feld ergibt sich mehr freie Kühlung und damit ein geringerer Stromverbrauch. Der Grund dafür ist, dass in beiden Fällen das für die freie Kühlung zuständige kalte Feld stärker abgekühlt wird.

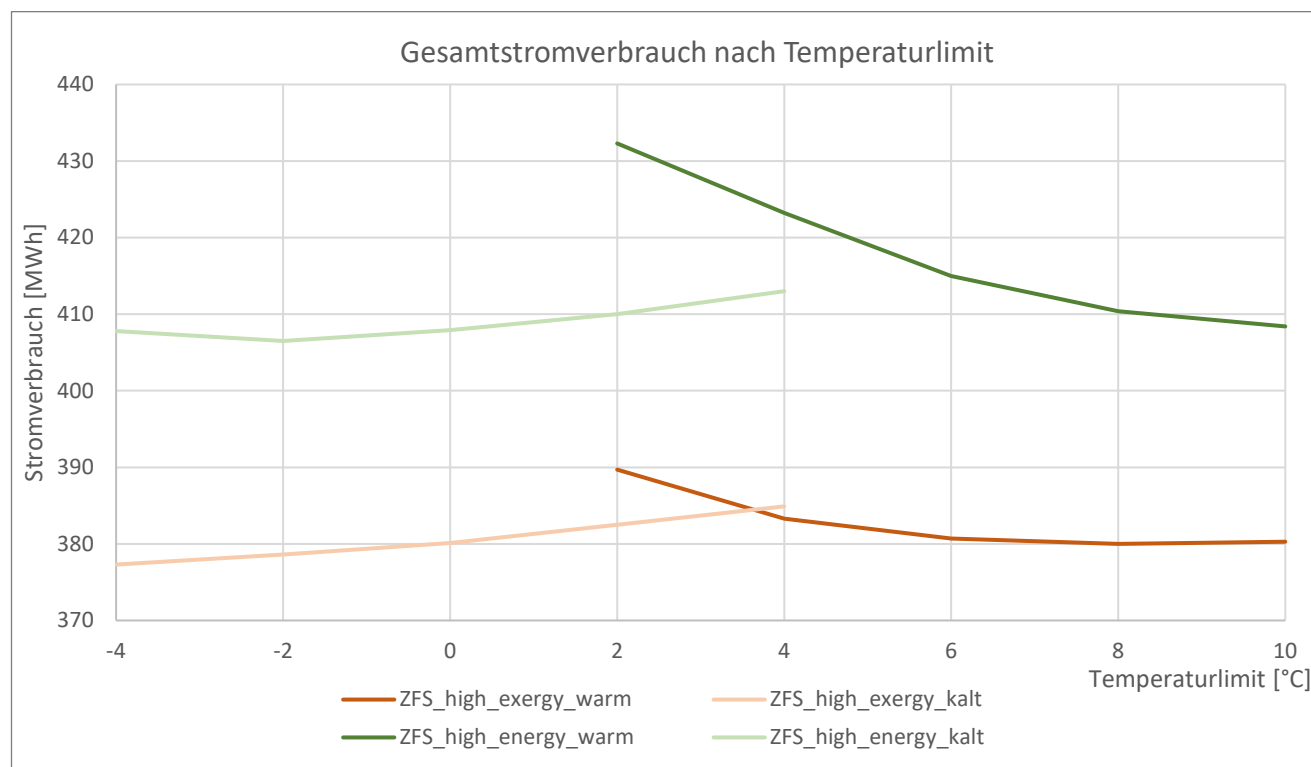




**Abbildung 24: Verlauf des Stromverbrauchs der Heizung und der forcierten Kühlung in Abhängigkeit der Sondenfeldgröße. (EFS = Einfeldspeicher, ZFS = Zweifeldspeicher)**



**Abbildung 25: Verlauf des Stromverbrauchs der Heizung und der forcierten Kühlung in Abhängigkeit der Größe des Solarmoduls. (EFS = Einfeldspeicher, ZFS = Zweifeldspeicher)**



**Abbildung 26: Verlauf des Stromverbrauchs der Heizung und der forcierten Kühlung in Abhängigkeit des Temperaturlimits des Wärmeentzugs. (ZFS = Zweifeldspeicher)**

### 4.3.2 Bewertung der verschiedenen Betriebsstrategien

Durch die Variation der Parameter Solarkollektorfläche, Betriebsart des Solarkollektors („High Energy“ vs. „High Exergy“), Betriebsart der Sondenfelder (Feldpriorität), und der Sondenfeldgrößen ergeben sich 12 verschiedene Varianten, die einer wirtschaftlichen Vorab-Analyse unterzogen wurden. Aus diesen 12 Varianten konnten „betriebskostenlastige“ und „investitionskostenlastige“ Varianten identifiziert werden. Basierend auf der Ersteinschätzung der Investitionskosten und dem Stromverbrauch der Wärmepumpen lässt sich ein Zusammenhang zwischen den Betriebsstrategien und den Kosten erkennen. Die „High Energy“ Szenarien stellen die betriebslastigen Varianten und die „High Exergy“ Szenarien die investitionslastigen Varianten dar. Für die Ersteinschätzung der Investitionskosten wurde einen Preis von 65 €/lm für die Erdwärmesonden und 700 €/m<sup>2</sup> für die Solarkollektoranlage angenommen. Im nächsten Schritt wurden für die Einfeldlösung und für die Zweifeldlösung jeweils die beste investitionslastige Variante mit einem niedrigeren Stromverbrauch und die beste betriebslastige Variante mit niedrigeren Investitionskosten für die dynamische Wirtschaftlichkeitsanalyse ausgewählt. Damit wurden in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung insgesamt 4 Varianten untersucht (Tabelle 14).

**Tabelle 14: Eigenschaften der für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ausgewählten Varianten. (EFS = Einfeldspeicher, ZFS = Zweifeldspeicher, Invest = investitionslastige Variante, Betrieb = betriebslastige Variante)**

Variante	EFS/Invest	EFS/Betrieb	ZFS/Invest	ZFS/Betrieb
	EFS_2_A	EFS_1_B	ZFS_4_A	ZFS_1_B
Betriebsstrategie	High Exergy	High Energy	High Exergy - kalte Feldpriorität	High Energy - warme Feldpriorität
T Limit Kalt [°C]	-	-	-2	-2
T Limit Warm [°C]	-	-	2	2
Solar Fläche [m2]	1800	1200	2000	1400
Bohrlochlänge [m] warmes Feld	150	150	150	150
Bohrlochlänge [m] kaltes Feld	-	-	150	150
Heizungspuffer Überladung	500	500	300	500
Sondenanzahl kaltes Feld (x)	-	-	8	6
Sondenanzahl kaltes Feld (y)	-	-	9	11
Sondenanzahl warmes Feld (x)	16	12	8	6
Sondenanzahl warmes Feld (y)	9	10	9	11
Sondenanzahl	144	120	144	132
Min. Vorlauf T warm [°C]	-1.3	-3	-2.9	-2.9
Max. Vorlauf T warm [°C]	29.8	29.8	29.8	31.7
Min. Vorlauf T kalt [°C]	-	-	-2.5	-3.3
Max. Vorlauf T kalt [°C]	-	-	20.9	20.9
Bilanz Warm %	3.2	0.6	-4.4	-2.5
Bilanz Kalt %	-	-	13.1	10
Stromverbrauch Heizungspuffer [MWh]	359.1	440	372.7	434
Stromverbrauch forcierte Kühlung [MWh]	60.8	90.7	15.2	22.8
Gesamtstromverbrauch [MWh]	419.9	530.7	387.9	456.8
Freie Kühlung [MWh]	430.3	203.5	774.8	717.6
Forcierte Kühlung [MWh]	459.5	686.3	115	172.2
COP HT	5.4	5.5	5.2	5.3
COP DHW	4.5	4.5	4.5	4.5
EER KL	7.6	7.6	7.6	7.6

Um die wichtigsten Eigenschaften der ausgewählten Varianten darzustellen, sind in Anhang 1 die folgenden Kurven und Diagramme dargestellt:

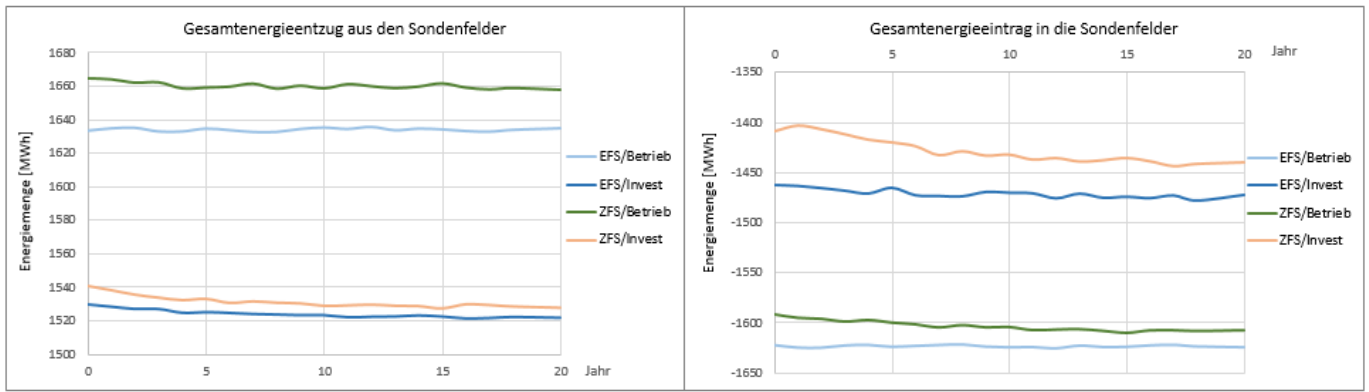
- (a) Rücklauftemperaturen der Sondenfelder
- (b) Kumulative Energiemengen und Jahresbilanzen der Sondenfelder
- (c) Spezifischer Wärmeentzug und Vorlauftemperatur des warmen Feldes
- (d) Spezifischer Wärmeentzug und Vorlauftemperatur des kalten Feldes
- (e) COP der Wärmepumpen
- (f) Energiefluss Diagramm

Die Zeitreihen des Energieentzugs aus den Erdwärmesondenfeldern, des Energieeintrags in die Sondenfelder und der im Heizungspuffer verbrauchten Solarenergie wurden in Abbildung 27 und Abbildung 29 dargestellt. Abbildung 28 zeigt, dass etwa die drei- bis fünffachen Solarenergiemengen im Heizungspuffer verwendet werden, wenn der Heizungspuffer Priorität bei der Nutzung der Solarthermie hat (**investitionslastige** Varianten mit „**High Exergy**“).

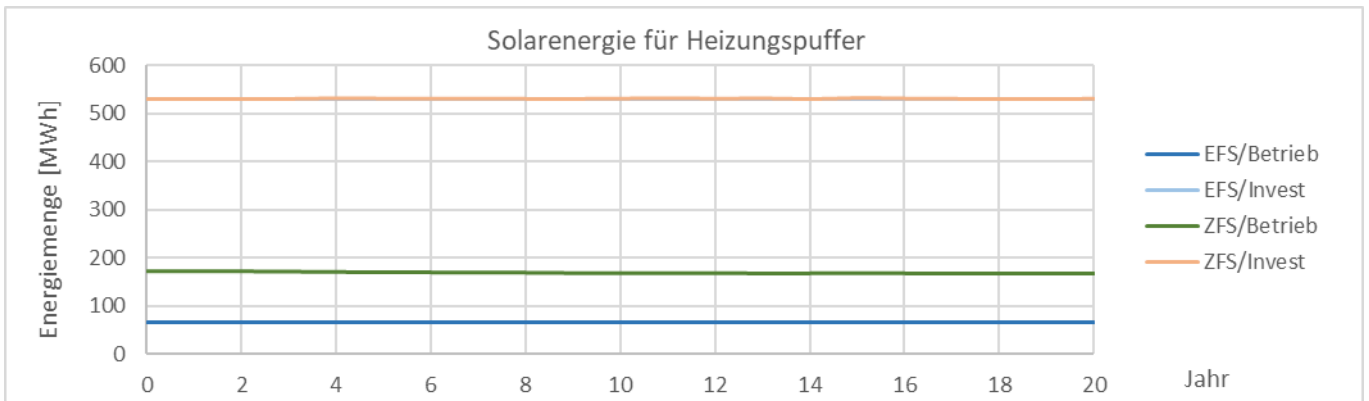
Dementsprechend wird bei den **betriebslastigen** Szenarien mit „**High Exergy**“, wobei die Solarenergie zuerst zur Regeneration der Sondenfelder verwendet wird, eine um ca. 100 MWh höhere Energiemenge den Erdwärmesondenfeldern entzogen und in die Felder eingetragen als bei den „**High Exergy**“ Szenarien. Dieser Unterschied kann sowohl bei den **Einfeld-** als auch bei den **Zweifeld-**Szenarien beobachtet werden.

Beim **Zweifelspeicher** wird der Wärmeentzug je nach Feldpriorität und Temperaturlimit des Wärmeentzugs auf die beiden Felder aufgeteilt. Aus den Diagrammen ist ersichtlich, dass bei **wärmer Feldpriorität** mehr Wärme dem warmen Feld und bei **kalter Feldpriorität** mehr Energie dem kalten Feld entzogen wird. Bei einer Betriebsstrategie mit „**High Exergy**“ (**investitionslastige** Varianten) wird mehr Wärme in das kalte Feld eingetragen als in das warme Feld. Das heißt, dass der Energieeintrag aus freier Kühlung den Energieeintrag aus Solarthermie übersteigt. Bei „**High Exergy**“ Szenarien (**betriebslastig**) liefert die Solarthermie die höheren Energiemengen für die Sondenfelder.

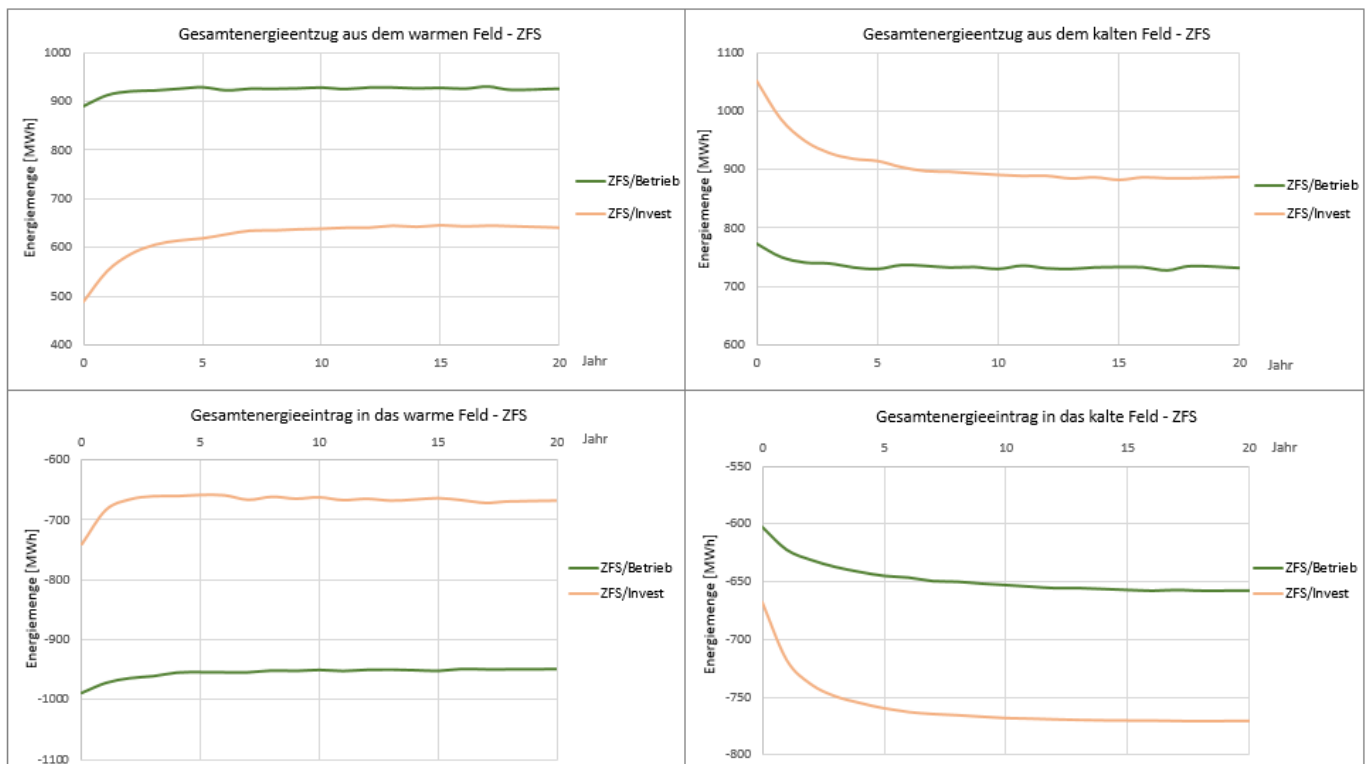
Im ersten Betriebsjahr zeichnet sich das kalte Feld durch einen hohen Wärmeentzug und wenig freie Kühlung aus. Die starke Steigerung der freien Kühlung und die Absenkung des Wärmeentzugs zeigen, dass das kalte Feld in den ersten Jahren schnell abkühlt. Mithilfe des solaren Energieeintrags wird hingegen das warme Feld in den ersten Jahren aufgewärmt, somit steigt der Wärmeentzug aus dem warmen Feld. Die Kurven zeigen, dass sich nach einigen Betriebsjahren die Energiemengen stabilisieren. Darüber hinaus bestätigen auch die Zeitreihen der Vorlauftemperaturen die schnelle Stabilisierung der Sondenfelder.



**Abbildung 27: Energieentzug aus den Sondenfeldern und Energieeintrag in die Sondenfelder in den ersten 20 Jahren. (EFS = Einfeldspeicher, ZFS = Zweifeldspeicher, Invest = investitionslastige Variante, Betrieb = betriebslastige Variante)**

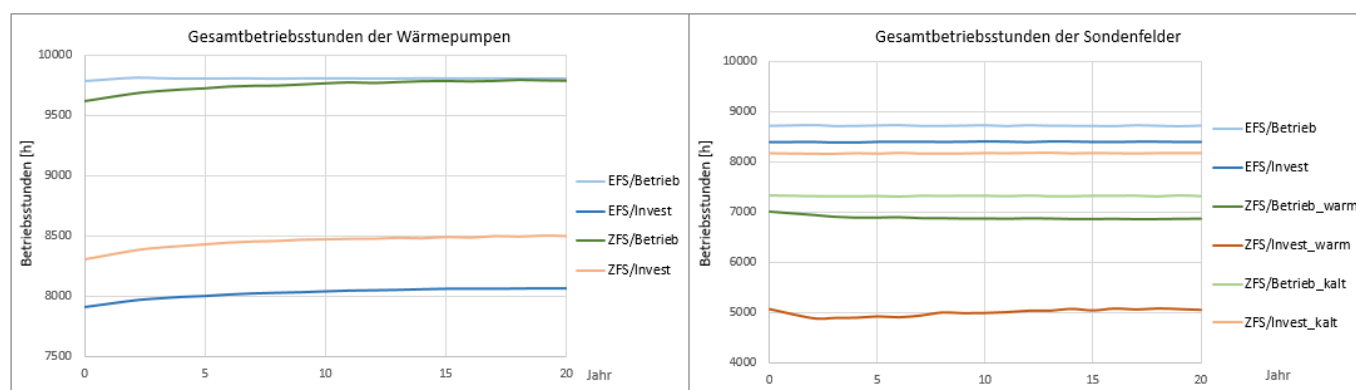


**Abbildung 28: Solarenergieeintrag in den Heizungspuffer in den ersten 20 Jahren. (EFS = Einfeldspeicher, ZFS = Zweifeldspeicher, Invest = investitionslastige Variante, Betrieb = betriebslastige Variante)**



**Abbildung 29: Energieentzug aus dem warmen/kalten Feld und Energieeintrag in das warme/kalte Feld in den ersten 20 Jahren. (ZFS = Zweifeldspeicher, Invest = investitionslastige Variante, Betrieb = betriebslastige Variante)**

Die Gesamtbetriebsstunden der fünf Wärmepumpen und die Gesamtbetriebsstunden der Sondenfelder wurden in Abbildung 30 dargestellt. Die Kurven zeigen, dass die Betriebsstunden der Wärmepumpen in den ersten Jahren steigen, aber sie stabilisieren sich nach einigen Betriebsjahren. Bezüglich der Gesamtbetriebsstunden der Sondenfelder ist bei den **investitionslastigen** Varianten („**High Exergy**“) ein leichter Aufwärtstrend und bei den **betriebslastigen** Varianten („**High Exergy**“) ein leichter Abwärtstrend zu beobachten. Die Schwankungen sind jedoch nicht signifikant. Allerdings ist bei den **betriebslastigen** Varianten mit höheren Betriebsstunden für die Wärmepumpen und die Sondenfelder zu rechnen. Anhand der Grafiken der COPs lässt sich keine Verbesserung der Performance der Wärmepumpen feststellen.



**Abbildung 30: Gesamtbetriebsstunden der fünf Wärmepumpen und der Sondenfelder. (ZFS = Zweifeldspeicher, Invest = investitionslastige Variante, Betrieb = betriebslastige Variante)**

Um den Stromverbrauch der hydraulischen Pumpen zu ermitteln, wurden die Pumpen den Betriebsweisen zugeordnet (Abbildung 31). Auf Basis der Druckerhöhung und des Volumenstroms konnte die elektrische Leistung der Pumpen ermittelt werden. Für jede hydraulische Pumpe wurde ein Betriebspunkt ausgewählt, für den die elektrische Leistung mithilfe des Berechnungstools von Grundfos berechnet wurde (<https://product-selection.grundfos.com/at/products/nb-nbe-nbe-series-2000/nbe/nbe-80-160146-99099872?tab=variant-curves&pumpsystemid=1651643729>). Die Simulationen ergaben die Anzahl der in Betrieb befindlichen Wärmepumpen pro Stunde, woraus der jährliche Stromverbrauch der hydraulischen Pumpen ermittelt wurde. Für die restlichen Pumpen, außer den Pumpen des Solarbetriebs, wurde für jede Stunde die Anzahl der laufenden Pumpen unter Berücksichtigung der maximalen Leistung der Betriebsweise ermittelt und dann aus den Stundenwerten Jahressummen gebildet. Dadurch ergibt sich der jährliche Stromverbrauch der hydraulischen Pumpen. Da die Anzahl der parallel geschalteten Pumpen für ein Sondenfeld mit 72 Sonden und eine Solarkollektorfläche von 1400 m<sup>2</sup> bestimmt wurde, wurde der Stromverbrauch der Pumpen bei den Sondenfeldern und bei dem Solarbetrieb auf die tatsächliche Größe der Sondenfelder und der Solarkollektorflächen skaliert.

Anhand der Kurven des Stromverbrauchs ist für die hydraulischen Pumpen mit ungefähr 10 % des Stromverbrauchs der Wärmepumpen zu rechnen (Abbildung 32). Bei den investitionslastigen Varianten ist der Anteil der hydraulischen Pumpen an dem Stromverbrauch etwas höher: 12 % des Stromverbrauchs der Wärmepumpen beim Einfeldspeicher und 13 % beim Zweifeldspeicher. Bei den betriebslastigen Varianten beträgt der Stromverbrauch der hydraulischen Pumpen 9 (Einfeldspeicher) bzw. 10 % (Zweifeldspeicher) des Stromverbrauchs der Wärmepumpen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei

den investitionslastigen Varianten die Solarenergie zuerst im Heizungspuffer verwendet wird („High Exergy“), was die Solarbetriebsstunden erhöht und den Stromverbrauch der Wärmepumpen reduziert. Die hydraulischen Pumpen des Solarbetriebs weisen die höchste elektrische Leistung auf. Dadurch ergibt sich ein höheres Verhältnis vom Stromverbrauch der hydraulischen Pumpen zum Stromverbrauch der Wärmepumpen als bei den betriebslastigen Varianten.

Die Szenarienmodellierung bestätigt, dass die Investitionskosten nur zu Lasten des Stromverbrauchs und der freien Kühlung reduziert werden können. Um die Ergebnisse der Szenarienmodellierung gegenüberzustellen und zu bewerten, wird eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt.

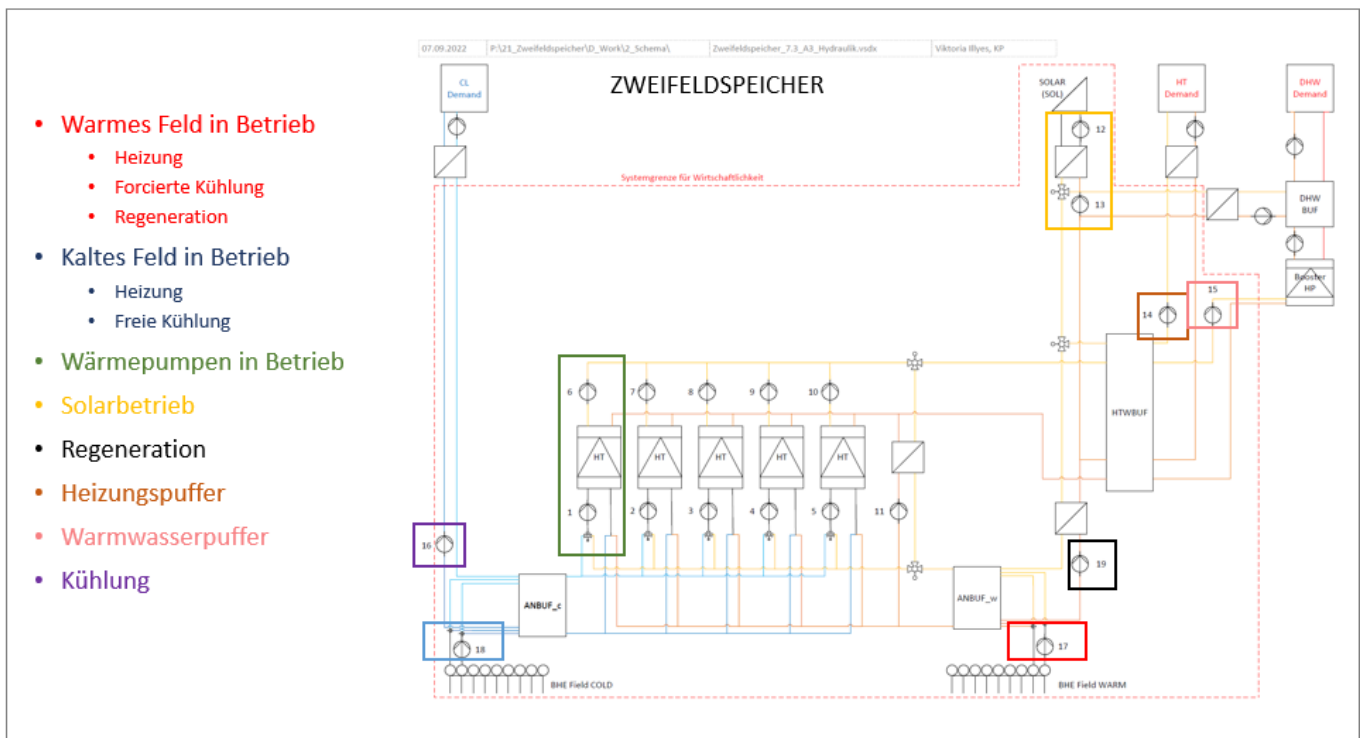


Abbildung 31: Zuordnung der hydraulischen Pumpen zu den Betriebsweisen.

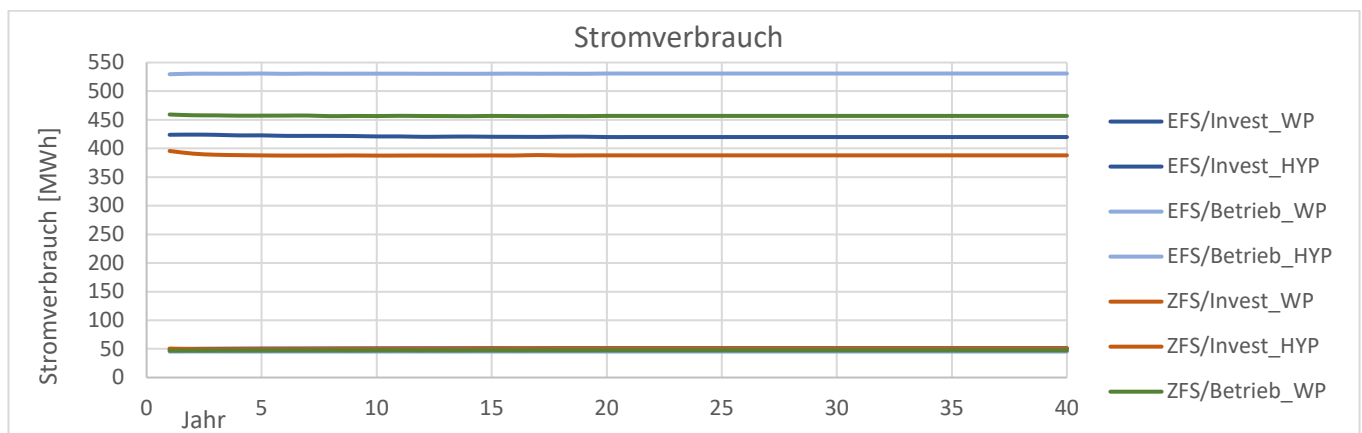


Abbildung 32: Stromverbrauch der Wärmepumpen und der hydraulischen Pumpen. (EFS = Einfeldspeicher, ZFS = Zweifeldspeicher, Invest = investitionslastige Variante, Betrieb = betriebslastige Variante, WP = Wärmepumpe, HYP = hydraulische Pumpe)

## **5 Wirtschaftlichkeit**

Im Projekt Zweifeldspeicher wurde zur Begleitung der technischen Konzepterstellung und Modellierung auch eine betriebswirtschaftliche Systemanalyse durchgeführt. Der Fokus lag hierbei auf der Untersuchung strategischer Unterschiede der bereits oben dargestellten Szenarien Einfeldspeicher investitionslastig (EFS-I), Einfeldspeicher betriebslastig (EFS-B), Zweifeldspeicher investitionslastig (ZFS-I) und Zweifeldspeicher betriebslastig (ZFS-B). Allen Szenarien war – wie auch im Rahmen der technischen Analysen – ein konstantes Nachfrageprofil gemein. Das heißt, es handelte sich auch im Rahmen der betriebswirtschaftlichen Systemanalyse stets um unterschiedliche Szenarien zur Befriedigung desselben Nachfrageprofils.

### **5.1 Betriebswirtschaftliche Systemdefinition**

Die betriebswirtschaftliche Systemdefinition und -abgrenzung orientiert sich an den technischen Systemgrenzen, die in Abschnitt 2.1 dargestellt wurden. Die in der betriebswirtschaftlichen Systemanalyse erfassten Investitions- und Betriebskosten betreffen dabei alle Komponenten, die auch Gegenstand der technischen Modellbildung waren.

Entsprechend der zentralen Forschungsfrage wurde die betriebswirtschaftliche Systemanalyse und damit auch die Systemdefinition als Innensicht des Systems aufgesetzt. Das heißt, die betriebswirtschaftliche Schnittstelle zur Nachfrage könnte z. B. ein Wärme- und Kältecontractor sein, der Wärme bzw. Kälte an der Schnittstelle der Heizzentrale zum Wärme- bzw. Kälteverteilsystem einem übergelagerten Glied der Wertschöpfungskette verkauft. Das Wegblenden des Wärme- bzw. Kälteverteilsystems reduziert zwar die Möglichkeiten z. B. einen Endkunden-Wärmepreis zu deklarieren, erhöht jedoch den Kontrast beim Systemvergleich der Szenarien, was im konkreten Fall ja Gegenstand der Untersuchung war.

### **5.2 Kostenstruktur**

Im zeitlichen Rahmen des Projektverlaufs (November 2021 bis November 2022) wurden in Hinblick auf betriebswirtschaftliche Systemanalysen im Energiebereich quasi alle etablierten klassischen Parametersettings revidiert. Dies betraf sowohl Technologie- und Energiepreise als auch Dienstleistungstarife. Hintergründe waren dabei vor allem die Auswirkungen der Maßnahmen gegen die Covid 19-Pandemie, sowie ab Februar 2022 auch die Auswirkungen des Angriffskrieges Russlands gegen die Ukraine. Die Veränderungen der relevanten Preise wurden über den Projektverlauf beobachtet und es stellte sich die Frage, wie und ob die Diskontinuitäten der allgemeinen Wirtschaftsentwicklung bei der gegenständlichen betriebswirtschaftlichen Systemanalyse berücksichtigt werden können.

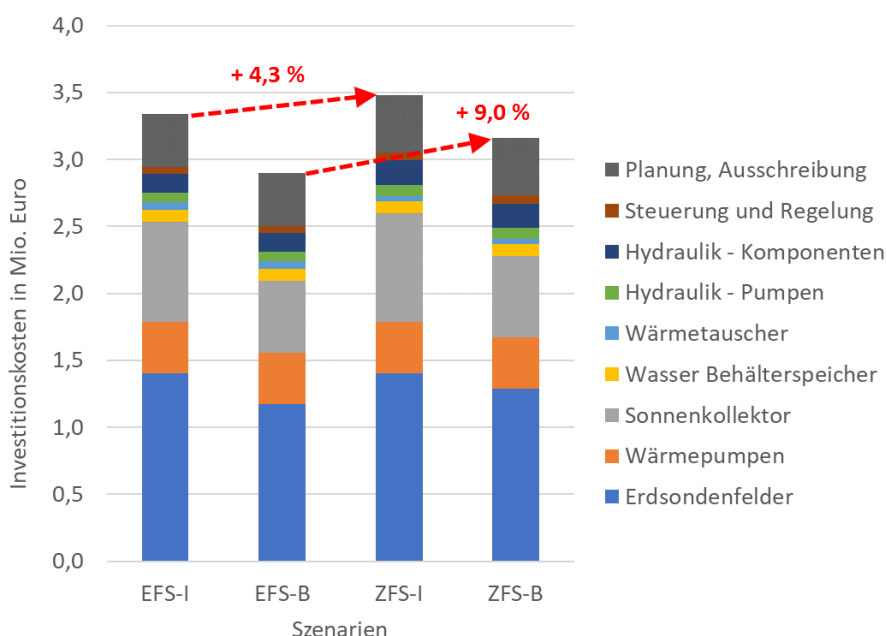
Die neue betriebs- und volkswirtschaftliche Realität wurde schlussendlich durch entsprechende Parametersettings und durch generell großzügige Wertebereiche des Kalkulationszinsfußes berücksichtigt. Hierbei wurden sowohl klassische Parametersettings untersucht, welche die betriebswirtschaftlichen Rahmenbedingungen des Zeitraums vor 2020 (also vor der Covid 19-Pandemie) abbilden, als auch solche Settings, welche die Rahmenbedingungen im Jahr 2022 repräsentieren.



Für die Errichtungsphase des Wärmebereitstellungssystems wurde ein Zeitraum von 3 Jahren angenommen, da der Zeitablaufplan in der Realität auch mit dem Projektablauf der Gebäudeerrichtung gekoppelt ist. Hierbei wurden Teile der Gesamtinvestition bei Projektbeginn vorgesehen (z. B. die Errichtung der Erdsondenfelder) und andere Teile zu einem späteren Zeitpunkt (z. B. die Errichtung der Energiezentrale im bereits fertiggestellten Baukörper). Die nominalen (nicht diskontierten) Investitionskosten sind – anteilmäßig den wesentlichen Systemkomponenten zugeordnet – in Tabelle 15 zusammengefasst und in Abbildung 33 veranschaulicht.

**Tabelle 15: Anteile an den Investitionskosten in den vier untersuchten Szenarien**

Anteile in %	EFS-I	EFS-B	ZFS-I	ZFS-B
Erdsondenfelder (Hardware & Dienstleistung)	42 %	40 %	40 %	41 %
Wärmepumpen (Hardware & Dienstleistung)	12 %	13 %	11 %	12 %
Sonnenkollektor (Hardware & Dienstleistung)	22 %	19 %	23 %	19 %
Wasser Behälterspeicher (Hardware)	3 %	3 %	3 %	3 %
Wärmetauscher (Hardware)	2 %	2 %	1 %	1 %
Hydraulik – Pumpen (Hardware)	2 %	2 %	2 %	3 %
Hydraulik – Komponenten (Hardware & Dienstleistung)	4 %	5 %	5 %	6 %
Steuerung und Regelung (Hardware & Dienstleistung)	1 %	2 %	2 %	2 %
Planung, Ausschreibung, Bauaufsicht, Abnahme	12 %	13 %	12 %	14 %
Summe [ %]	100 %	100 %	100 %	100 %
Summe [Mio. €]	3,337	2,898	3,481	3,159

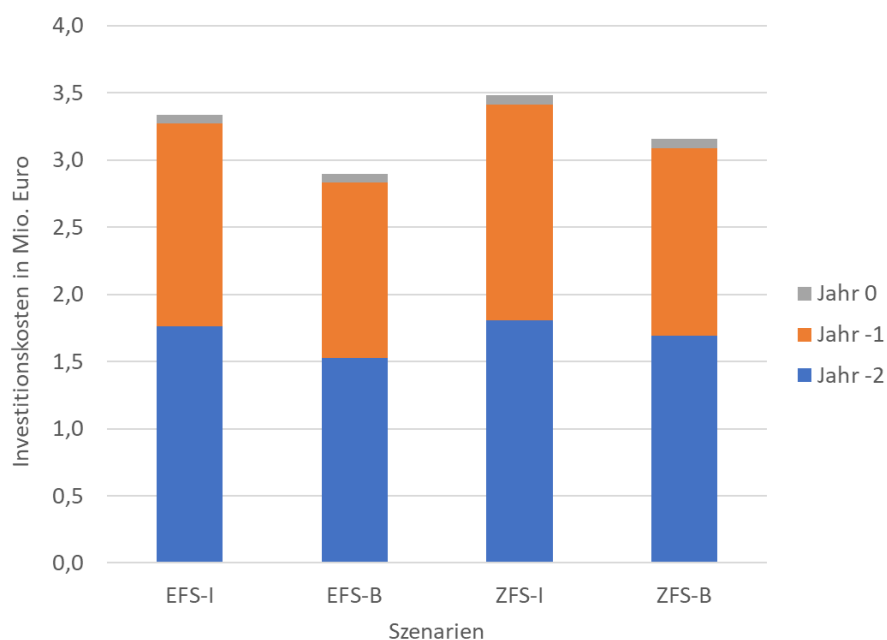


**Abbildung 33: Absolute Investitionskosten in den untersuchten Szenarien**

Die Ergebnisse weisen das Szenario Einfeldspeicher betriebslastig als jenes mit den geringsten Investitionskosten in der Höhe von 2,9 Mio. Euro aus. Die größten Summen entfallen dabei auf die Systemkomponenten Erdsondenfelder (40 %), Sonnenkollektoren (19 %) und Projektdienstleistungen

(Planung, Ausschreibung, Bauaufsicht, Abnahme; 12 %) sowie Wärmepumpen (12 %). Die Unterschiede in den Investitionskosten der jeweils direkt vergleichbaren investitionslastigen und betriebslastigen Szenarien bewegt sich in einem überschaubaren Bereich von + 4,3 % (EFS-I vs. ZFS-I) bzw. + 9,0 % (EFS-B vs. ZFS-B). Das Systemkonzept des Zweifeldspeichers ist damit jeweils mit höheren Investitionskosten verbunden, als jenes des Einfeldspeichers. Die Mehrkosten sind dabei vor allem im Bereich der Hydraulikkomponenten, der Projektdienstleistungen und der Steuerung und Regelung lokalisiert.

Die Investitionskosten nach Investitionszeitpunkt sind in Abbildung 34 dargestellt. Dies ist unter einer dynamischen (d. h. realen) Betrachtung aus der Sicht der Kapitalkosten von Interesse. Die Unterschiede in den einzelnen Szenarien sind jedoch gering und werden in Zeiten moderater Kapitalbeschaffungskosten kaum ausschlaggebend sein. Der geringe Beitrag des Jahres 0 erklärt sich aus der Zeitspanne zwischen der technischen Fertigstellung des Wärme- bzw. Kältebereitstellungssystems und der Fertigstellung des gesamten Quartiers. Im dynamischen Wirtschaftlichkeitsmodell wurde das Jahr +1 als das erste Jahr im Regelbetrieb definiert.



**Abbildung 34: Investitionskosten (statisch) nach Investitionszeitpunkt**

In Ergänzung zu den oben dargestellten Investitionskosten sind die Betriebskosten zu sehen. Diese setzen sich aus dem Betriebsaufwand an elektrischem Strom als Antriebsenergie des allelektrischen Systems und aus Dienstleistungen (z. B. Wartungsvertrag bezüglich Wärmepumpen) zusammen. Hinzu kommen dann noch Reinvestitionen, die im Wesentlichen aus der Erneuerung der Wärmepumpen nach 20 Jahren und der Erneuerung der solarthermischen Anlage nach 25 Jahren resultieren. Die dominanten Kosten aus diesen Kategorien sind jedoch jene für die Antriebsenergie elektrischer Strom für den Betrieb der Wärmepumpenaggregate und die hydraulischen Pumpen. Die entsprechenden Kosten sind in Abbildung 35 für die vier gegenübergestellten Szenarien dargestellt.

Die Verhältnisse bezüglich Stromverbrauch präsentieren sich gegenläufig zu den oben dargestellten Investitionskosten. Bei einer Gegenüberstellung der direkt vergleichbaren Szenarien zeigen die

Zweifeldspeicher-Szenarien jeweils geringere mittlere Stromverbräuche. Der Unterschied beträgt bei den investitionslastigen Ansätzen minus 7,0 % und bei den betriebslastigen Ansätzen minus 12,5 %. Dargestellt sind dabei jeweils die mittleren jährlichen Stromverbräuche über die Nutzungsperiode von 40 Jahren, da die Stromverbräuche in den ersten Betriebsjahren etwas vom eingeschwungenen langfristigen Zustand abweichen, wie dies bereits in vorangegangenen Abschnitten dargestellt wurde. Die jeweils höheren Investitionskosten bei den Zweifeldspeicher-Szenarien können sich je nach Parametersetting im dynamischen Wirtschaftlichkeitsmodell also durch Einsparungen bei den Betriebsaufwänden rechnen.

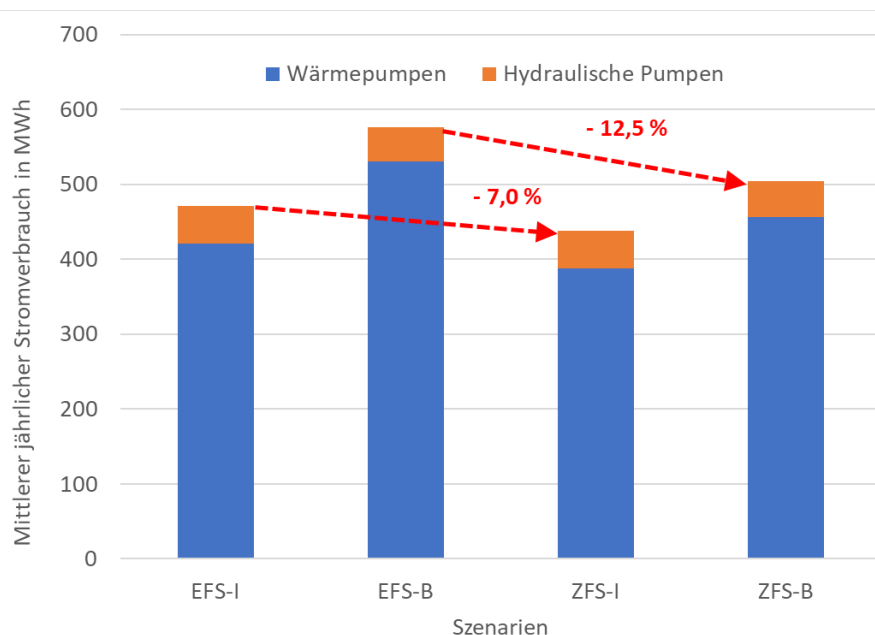


Abbildung 35: Mittlerer jährlicher Stromverbrauch in den vier Szenarien

## 5.3 Wirtschaftlichkeitsmodell

Der betriebswirtschaftliche Systemvergleich wurde im Projekt Zweifeldspeicher auf Basis der Kapitalwertmethode durchgeführt. Bei diesem dynamischen methodischen Ansatz wird ein Bezugszeitpunkt definiert, zu dem hin alle zeitlich vorgelagerten Ein- und Auszahlungen mit dem Kalkulationszinsfuß aufgezinst werden und alle nach dem Bezugszeitpunkt stattfindenden Ein- und Auszahlungen abgezinst werden. Die Summe über alle auf- und abgezinsten Ein- und Auszahlungen ist dann der (dynamische) Kapitalwert. Dieser stellt den monetären Wert eines Projektes unter definierten Zinsen (Kalkulationszinsfuß) dar. Wird der Kapitalwert eines Projektes bei einem bestimmten Kalkulationszinsfuß null, so wird dieser Kalkulationszinsfuß als interner Zinsfuß bezeichnet. Ein hypothetischer Investor kann damit seine maximal mögliche Zinserwartung ermitteln. Um der allgemeinen Wirtschaftsentwicklung im Jahr 2022 Rechnung zu tragen, wurde der Wertebereich des Kalkulationszinsfußes für die Parametervariationen auf 0 % bis 15 % festgelegt. Hintergründig wäre der Wert 0 % (oder ein niedriger Zinssatz, ggf. der Zinssatz einer öffentlichen Kreditaufnahme) einem gemeinnützigen Investor ohne Profiterwartung zuzuordnen, während das andere Ende des Wertebereichs

einem profitmaximierenden Investor mit hochverzinsten und risikoarmen alternativen Anlageformen zuzuordnen wäre. Der Kalkulationszinsfuß ist im Weiteren der Haupt- oder Stammparameter, der in den Betrachtungen stets über den genannten Wertebereich variiert wird.

Nebenparameter waren im Zuge der Systemvergleiche die Preise und deren jährliche Teuerung von elektrischer Endenergie (die Antriebsenergie des gesamten Systems), Wärme (Lieferung von Wärme für die Raumwärmebereitstellung und Brauchwassererwärmung), Kälte (für die Raumkühlung), Dienstleistung (Planungs-, Errichtungs-, Wartungs- und Revitalisierungsdienstleistungen) und Hardware (Technische Komponenten), jeweils an der Systemgrenze. Die Preise wurden dabei je nach Parametersetting (konservativ vs. Teuerungsszenarien) für das Bezugsjahr festgesetzt. Die jeweiligen Teuerungen wurden in % pro Jahr festgelegt und für die gesamte Kalkulationsperiode als konstant definiert. Dies stellt bei hohen Teuerungsraten eine kritische Annahme dar, da selbige in der Realität über den sehr langen Modellzeitraum (insgesamt 43 Jahre, davon 3 Jahre in die Vergangenheit und 40 Jahre in die Zukunft) in der Praxis aufgrund der exponentiellen Verläufe nicht in hohen Wertebereichen bleiben können. Die Auswirkungen solcher Annahmen werden vor allem bei geringen Kalkulationszinsfüßen sichtbar. Im Falle hoher Diskontierung werden die Teuerungseffekte (teilweise) durch die Eigenheiten der Analysemethoden kompensiert. Eine alternative Herangehensweise bestünde aus der Implementierung von nicht konstanten Teuerungsraten, deren Definition jedoch ausschließlich Fiktion wäre und die deshalb nicht in Erwägung gezogen wurde.

Im Rahmen des Projektes Zweifeldspeicher wurde das Wirtschaftlichkeitsmodell zur Gegenüberstellung der Szenarien auf der Ebene eines Tabellenkalkulationsprogrammes programmiert. Im Anschluss wurden zahlreiche Parametervariationen ausgeführt, um strategisch relevante Unterschiede zwischen den Szenarien herauszufiltern, die verallgemeinernde Schlussfolgerungen ermöglichen. Die in weiterer Folge hier dargestellten Ergebnisse für konkrete Parametersettings sollen einerseits zur Veranschaulichung des dynamischen Wirtschaftlichkeitsmodells dienen und andererseits einen Bogen möglicher Ergebnisse aufspannen.

## 5.4 Betriebswirtschaftliche Variantenrechnung

An dieser Stelle werden drei ausgewählte Parametersettings dokumentiert. Sie tragen die Attribute "klassisch", "moderat" und "Teuerung" und werden durch Parametersettings definiert, wie sie im Zeitraum vor 2020 (klassisch), Anfang 2022 (moderat) und Ende 2022 (Teuerung) im mitteleuropäischen Raum tatsächlich zu beobachten waren.

### Parametersetting „klassisch“

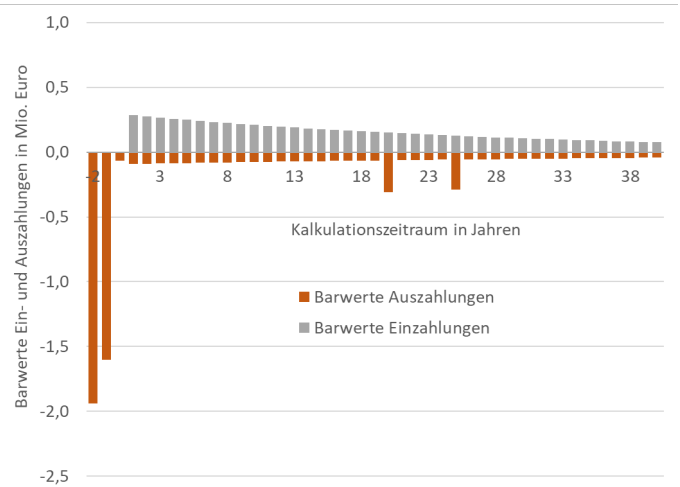
Abbildung 36 zeigt hierzu das Parametersetting "klassisch" mit einer Darstellung der diskontierten Ein- und Auszahlungen für einen Kalkulationszinsfuß von 5 %, exemplarisch für das investitionslastige Einfeldspeicher-Szenario. Dieses Szenario weist unter dem klassischen Parametersetting einen internen Zinsfuß von 4,4 % auf. In der Abbildung sind weiter die Investitionsphase (Jahr -2 bis Jahr 0), der Regelbetrieb ab Jahr 1 und die Reinvestitionen in den Jahren 20 und 25 zu erkennen. Um einen Vergleich der Szenarien zu ermöglichen, sind in Abbildung 37 die Ergebnisse für den Kapitalwert über dem Kalkulationszinsfuß für alle vier Szenarien unter den Rahmenbedingungen des klassischen Parametersettings dargestellt.

**Parameter: klassisch**

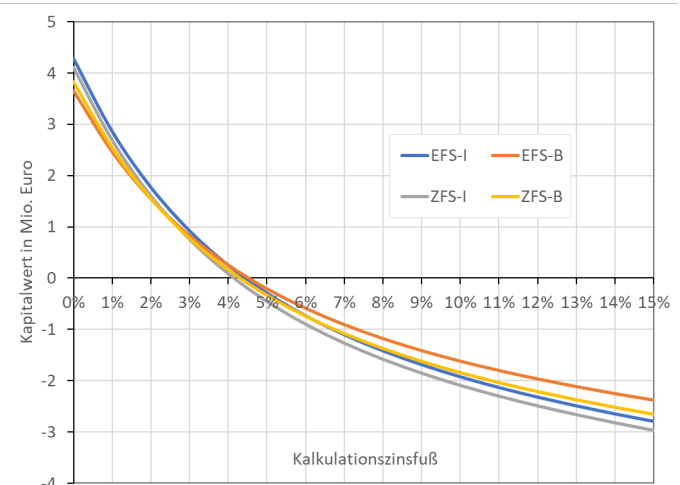
Strompreis Basis: 150 €/MWh  
 Wärmepreis Basis: 80 €/MWh  
 Kältepreis Basis: 100 €/MWh  
 Teuerung Hardware: +1,0 % p.a.  
 Teuerung el. Strom: +3,0 % p.a.  
 Teuerung Wärme: +1,5 % p.a.  
 Teuerung Kälte: +1,5 % p.a.  
 Teuerung Service: +3,0 % p.a.

**Resultat:**

Kapitalwert (Z=5 %) = **-0,3 Mio. €**  
 Interner Zinsfuß = 4,4 %



**Abbildung 36: Diskontierte Ein- und Auszahlungen für das Szenario EFS-I und das klassische Parametersetting**



**Abbildung 37: Kapitalwert über Kalkulationszinsfuß für das klassische Parametersetting**

Auffällig ist zunächst, dass sich unter den getroffenen Annahmen alle vier Szenarien in einem engen Korridor bewegen. Bereits geringe Unschärfen in den getroffenen Annahmen, wie z. B. im Bereich der Investitionskosten, lassen die Unterschiede zwischen den Szenarien als nicht signifikant erscheinen. Selbst wenn diese Unsicherheiten in der Kostenkalkulation bei der Betrachtung der Ergebnisse weggeblendet werden, ist im Bereich positiver Kapitalwerte kaum ein bestimmtes Szenario zu favorisieren. Der interne Zinsfuß liegt bei den vier Szenarien in einem engen Wertebereich von 4,1 % (ZFS-I) bis 4,5 % (EFS-B). Diese Zinserwartung war unter den Rahmenbedingungen vor dem Jahr 2020 auch für nicht gemeinnützige Investoren denkbar, was sich unter den aktuellen Rahmenbedingungen Ende 2022 vermutlich schwer argumentieren ließe.

**Parametersetting „moderat“**

Das Parametersetting „moderat“, welches von höheren Ausgangswerten für die Energiepreise und geringfügig höheren jährlichen Teuerungsraten ausgeht, führt zu einer deutlichen wirtschaftlichen Attraktivierung der Ergebnisse und zu einer stärkeren Differenzierung der Szenarien im Bereich niedriger Kalkulationszinssätze, siehe Abbildung 38 und Abbildung 39. Die internen Zinssätze bewegen sich dabei

in einem Wertebereich von 9,1 % (ZFS-I) bis 9,3 % (EFS-I) und geben damit keinen Anreiz zur Bevorzugung eines speziellen Szenarios. Insgesamt bewegen sich die internen Zinssätze damit aber in einem Bereich, der auch für profitorientierte Investoren relevant ist.

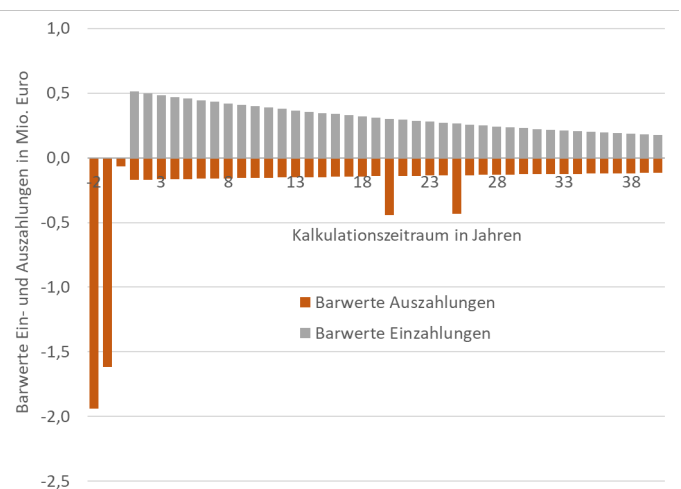
Im Bereich niedriger Kalkulationszinssätze ist im Vergleich zum klassischen Parametersetting durchaus eine differenzierte Betrachtung der Szenarien möglich. Bei einem Kalkulationszinssatz von 0 % sind die höchsten Kapitalwerte bei den Szenarien EFS-I und ZFS-I zu beobachten. Deutlich geringere Kapitalwerte treten beim Szenario ZFS-B und EFS-B auf. Aus strategischer Sicht wären dabei also auch für einen gemeinnützigen, nicht profitorientierten Investor die Szenarien ZFS-I und EFS-I zu präferieren.

**Parameter: moderat**

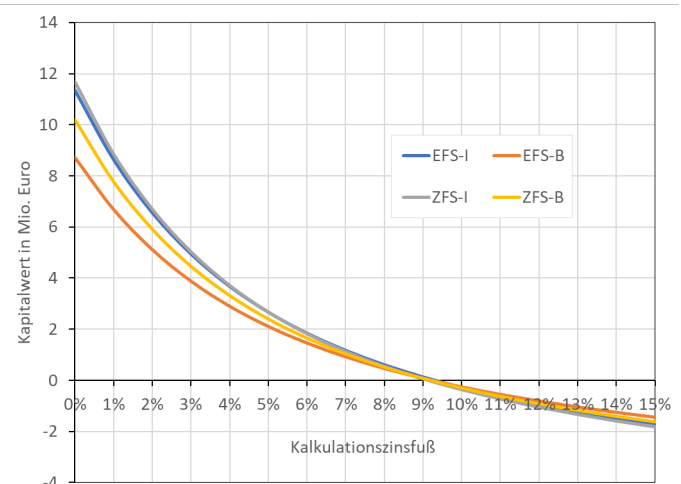
- Strompreis Basis: 300 €/MWh
- Wärmepreis Basis: 150 €/MWh
- Kältepreis Basis: 150 €/MWh
- Teuerung Hardware: +2,0 % p.a.
- Teuerung el. Strom: +4,0 % p.a.
- Teuerung Wärme: +2,0 % p.a.
- Teuerung Kälte: +2,5 % p.a.
- Teuerung Service: +4,0 % p.a.

**Resultat:**

- Kapitalwert (Z=5 %) = 2,7 Mio. €
- Interner Zinsfuß = 9,3 %



**Abbildung 38: Diskontierte Ein- und Auszahlungen für das Szenario EFS-I und das moderate Parametersetting**



**Abbildung 39: Kapitalwert über Kalkulationszinssfuß für das moderate Parametersetting**

**Parametersetting „Teuerung“**

Eine interessante Facette erbringt auch die Betrachtung eines extremen Teuerungssettings, wie es in Abbildung 40 und Abbildung 41 dargestellt ist. Eine generelle methodische Kritik betreffend hoher konstanter Teuerungsraten über einen langen Nutzungszeitraum wurde bereits oben angebracht. Es soll dieses Parametersetting deshalb auch nur qualitativ betrachtet werden, zumal es strategisch relevante Aspekte beinhaltet. Vorweg muss jedoch festgehalten werden, dass unter diesem Parametersetting kein positiver Kapitalwert des Projektes möglich ist, auch nicht bei sehr hohen Kalkulationszinssfüßen. Diese

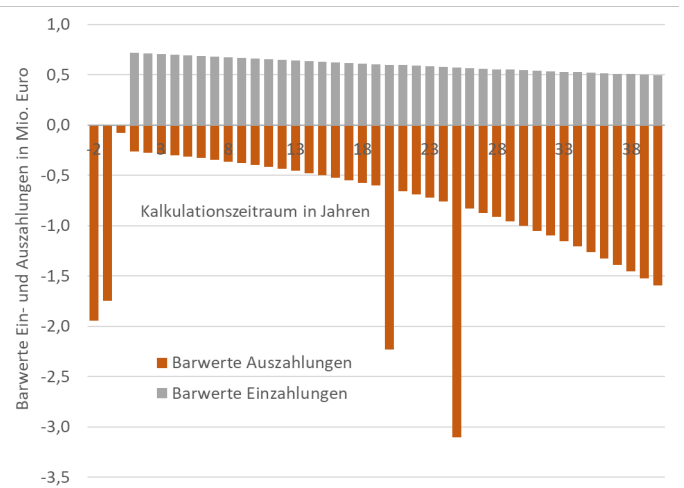
Ergebnisse können jedoch dorthin gehend interpretiert werden, dass wiederum die investitionslastigen Szenarien, allen voran das Szenario ZFS-I, den geringsten negativen Kapitalwert aufweisen. Dies kann bei Investitionsentscheidungen, die unter günstigeren Rahmenbedingungen getroffen werden, als strategische Risikominimierung in den Entscheidungsprozess einfließen.

**Parameter: Teuerung**

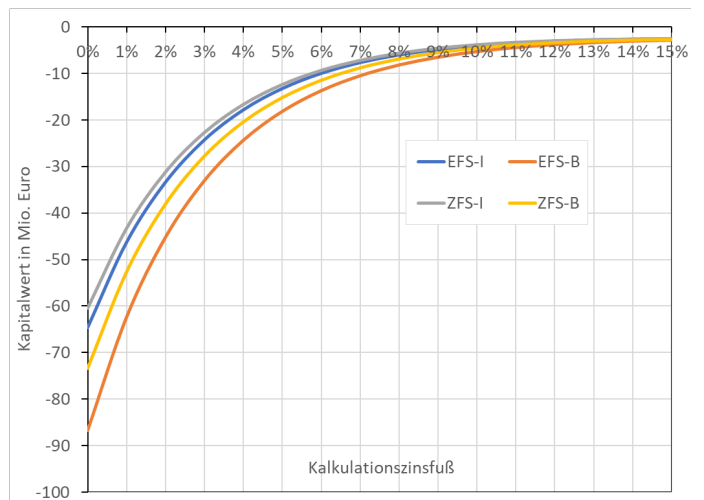
Strompreis Basis: 400 €/MWh  
 Wärmepreis Basis: 200 €/MWh  
 Kältepreis Basis: 200 €/MWh  
 Teuerung Hardware: +10,0 % p.a.  
 Teuerung el. Strom: +10,0 % p.a.  
 Teuerung Wärme: +4,0 % p.a.  
 Teuerung Kälte: +4,0 % p.a.  
 Teuerung Service: +10,0 % p.a.

**Resultat:**

Kapitalwert (Z=5 %) = **-13,3 Mio. €**  
 Interner Zinsfuß:  
 kein positiver Kapitalwert möglich



**Abbildung 40: Diskontierte Ein- und Auszahlungen für das Szenario EFS-I und das Teuerungs-Parametersetting**



**Abbildung 41: Kapitalwert über Kalkulationszinsfuß für das Teuerungs-Parametersetting**

Folgende Aspekte können aus der Sicht der betriebswirtschaftlichen Systemanalyse zusammengefasst werden:

- a) Innerhalb der vier untersuchten Szenarien treten bei den Zweifeldspeicher-Ansätzen vergleichsweise etwas höhere Investitionskosten und gleichzeitig etwas geringere Betriebsaufwände auf, was in Abhängigkeit von den konkreten Parametersettings im Wirtschaftlichkeitsmodell nur zu geringen Kontrasten unter den Szenarien führt, vor allem unter den Randbedingungen eines klassischen Settings.
- b) In den klassischen und moderaten Parametersettings erscheinen alle Szenarien als wirtschaftlich machbar und in Abhängigkeit von der Zinserwartung auch als wirtschaftlich attraktiv.
- c) Eine bessere Ausdifferenzierung der Szenarien ist unter den Randbedingungen höherer Energiepreise und höherer Teuerungsraten zu beobachten. Hier erweisen sich die investitionslastigen Szenarien als vorteilhaft.
- d) Unter den Rahmenbedingungen hoher Energiepreise und hoher Teuerungsraten zeigt das investitionslastige Zweifeldspeicher-Szenario die besten Eigenschaften. Auch unter dem Aspekt der Risikominimierung kann dieses Szenario somit präferiert werden.

Schlussfolgerungen, die aus den Ergebnissen der betriebswirtschaftlichen Systemanalyse gezogen werden können sind:

- a) Werden Erdsondenfelder projektiert, sollte der Ansatz des Zweifeldspeichers als Option in Betracht gezogen werden. Dies erscheint vor allem bei Projekten attraktiv, bei denen das Erdsondenfeld bereits aus strukturellen Gründen partitioniert werden muss. Bei solchen Projekten relativiert sich auch ein allenfalls vorhandener Mehraufwand im Bereich des erforderlichen Wärme-, Kälte- bzw. Anergienetzes, da die räumlich getrennten Felder unabhängig von der Bewirtschaftung mit Leitungsinfrastruktur erschlossen werden müssen.
- b) Das Forschungsprojekt "Zweifeldspeicher" wurde als Sondierungsprojekt durchgeführt um die prinzipielle techno-ökonomische Machbarkeit und Sinnhaftigkeit des generellen Ansatzes abzuklären. Der nächste Schritt sollte die Projektierung und Durchführung einer Pilot- und Demonstrationsanlage mit entsprechender Begleitforschung sein, um die theoretischen Erkenntnisse zu hintermauern und um praktische Komponenten zu erweitern.
- c) Wie im Rahmen der Ergebnispräsentation dargestellt, unterscheiden sich die Ergebnisse zu den vier analysierten Szenarien vor allem unter klassischen Rahmenbedingungen nur unwesentlich. Zur Initiierung eines oder mehrerer Pilot- und Demonstrationsprojekte sollte deshalb der innovative Ansatz des Zweifeldspeichers von öffentlicher Hand bezuschusst werden, um die vorhandenen Transaktionskosten und möglicher Weise seitens potenzieller Investoren subjektiv wahrgenommenen Risiken zu kompensieren.



## 6 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Um einen Vergleich der verschiedenen Betriebsstrategien zu erleichtern, wurden die Sondenfeldgröße, die Solarkollektorfläche, der Stromverbrauch der Wärmepumpen und die freie Kühlung in Diagrammen dargestellt (Abbildung 42). Die **betriebslastige** Variante („High Energy“) der **Einfeldlösung** erfordert mit 120 Erdwärmesonden und einer Solarkollektorfläche von 1200 m<sup>2</sup> die geringste Investition, allerdings zu Lasten des Stromverbrauchs und der freien Kühlung (EFS/Betrieb). Eine Erhöhung der Sondenanzahl auf 144 Stück und eine Erhöhung der Solarfläche auf 1800 m<sup>2</sup> führt laut Simulation zu einer Reduktion des Stromverbrauchs um ca. 110 MWh bzw. 20 %. Der Anteil an freier Kühlung kann dadurch verdoppelt werden (EFS/Invest).

Beim **Zweifeldspeicher** ist generell mit etwas höheren Investitionskosten zu rechnen, für das betrachtete Szenario wären mindestens 132 Erdwärmesonden und eine Solarkollektorfläche von 1400 m<sup>2</sup> erforderlich, um eine nachhaltige Nutzung zu gewährleisten. Andererseits kann mit der Zweifeldlösung der Stromverbrauch weiter um ca. 8 % (investitionslastige Szenarien) bis 14 % (betriebslastige Szenarien) reduziert und die freie Kühlung um 80 (investitionslastige Szenarien) bis 250 % (betriebslastige Szenarien) erhöht werden. Wie bei der Einfeldlösung werden auch beim Zweifeldspeicher weniger Erdwärmesonden und eine kleinere Solarkollektorfläche beim „**High Energy**“ Szenario benötigt. Hier wurde die Feldpriorität auf das warme Feld im Winter und auf das kalte Feld im Sommer gelegt (ZFS/Betrieb). Bei der „**High Exergy**“ Variante mit kalter Feldpriorität führt die Erhöhung der Sondenanzahl und der Solarkollektorfläche zu 15 % weniger Stromverbrauch und 8 % mehr freier Kühlung (ZFS/Invest).

Ein Vergleich der investitionslastigen Varianten der Einfeldlösung (EFS/Invest) und der Zweifeldlösung (ZFS/Invest), beide mit 144 Sonden, zeigt, dass die Aufteilung des Erdwärmesondenfeldes in ein warmes und ein kaltes Feld einen um ca. 8 % niedrigeren Stromverbrauch und etwa 80 % mehr freie Kühlung ermöglicht. Der Hauptvorteil des Zweifeldspeichers gegenüber der Einfeldlösung liegt in der Möglichkeit der freien Kühlung. Abbildung 43 zeigt, dass beim Einfeldspeicher nur 23 bis 48 % des Kühlbedarfs durch freie Kühlung gedeckt werden können, während beim Zweifeldspeicher der Anteil der freien Kühlung bei 79 % bis 86 % liegt.

Das Konzept „Zweifeldspeicher“ erscheint insbesondere für Anwendungsfälle interessant, wo ein Kühlbedarf auf verschiedenen Temperaturniveaus besteht, also ein Bedarf für sanfte Raumkühlung im Wohnbereich und auch ein Bedarf für Klimatisierung mit Möglichkeit zur Raumluftentfeuchtung, etwa im Gewerbebereich. Ein gemischtes Wohnquartier war daher die optimale Annahme für das Zweifeldspeicherkonzept. Es konnte im Rahmen des Projekts prinzipiell gezeigt werden, dass sich die Performance eines Erdsondenspeichers durch die Umsetzung des Konzepts „Zweifeldspeicher“ positiv beeinflussen lässt. In der Gesamtbetrachtung der betriebswirtschaftlichen Systemanalyse lassen sich zwar keine markanten Unterschiede zwischen den ausgearbeiteten Fallbeispielen ableiten, unter den getätigten Annahmen sind alle vier Szenarien in klassischen und in moderaten Parametersettings wirtschaftlich darstellbar. Ein großer Vorteil für die Zweifeldspeicherlösung ist ein höheres Maß an Flexibilität. Durch Adaptierung der Betriebsweise kann das Gesamtsystem in der Betriebsphase noch

weiter optimiert und auch an geänderte Rahmenbedingungen angepasst werden. So ist beispielsweise in Zukunft aufgrund des Klimawandels mit steigendem Kühl- und sinkendem Heizbedarf zu rechnen.

Im Bereich der Sektorkopplung wird der Erdwärmenutzung durch die hohe Trägheit generell eine große Bedeutung beigemessen. Ein steigender Anteil an Erneuerbaren am Energiemix wird die Volatilität des Strommarkts voraussichtlich weiter beeinflussen, Wärmepumpentarife mit EVU-Sperrzeiten oder flexiblen, stündlich angepassten Energiepreisen werden unter diesen Rahmenbedingungen sicher an Bedeutung gewinnen. Das Zweifeldspeicherkonzept bietet gegenüber konventioneller Erdwärmenutzung zusätzliche Flexibilität, um auch auf Entwicklungen auf dem Strommarkt reagieren zu können.

Die Untersuchungen im Projekt „Zweifeldspeicher“ beschränkten sich auf die Quartiersebene. Größer gedacht kann das Konzept in Kombination mit Fernwärme und Fernkälte auf Stadtentwicklungsgebiete angewendet werden: Der warme Speicher würde zum Beispiel aus (dem Rücklauf) der Fernwärme gespeist und kann als Tages- bis Saisonalpuffer gesehen werden, während der kalte Puffer in der Heizsaison zur Unterstützung der Fernwärme mittels Wärmepumpe den Niedrigtemperatursektor abdecken kann. Im Sommer kann freie Kühlung aus dem kalten Feld bezogen werden, für Entfeuchtungsanwendungen muss auf eine Kältemaschine oder Fernkälte zurückgegriffen werden.

Der zusätzliche Aufwand im Bereich der Hydraulik kann als gering eingestuft werden, insbesondere, wenn aufgrund der bauseitigen Gegebenheiten ohnehin zwei oder mehrere Sondenfelder errichtet werden müssen.

**Tabelle 16: Entscheidungskriterien für die Umsetzung einer Zweifeldspeicherlösung**

Kriterium	Einfeldspeicher	Zweifeldspeicher
<b>Kühlbedarf</b>	Erdsondenfelder müssen um einen dauerhaft effizienten Betrieb zu gewährleisten bilanziert betrieben werden. Wenn kein ausreichender Kühlbedarf besteht muss anderweitig regeneriert werden. Bei Regeneration und Kühlung besteht ein Gleichzeitigkeitsproblem.	Das volle Potenzial kann gehoben werden, wenn sowohl Free-Cooling, als auch Klimatisierungsbedarf auf niedrigerem Temperaturniveau gegeben ist.
<b>Platzanspruch</b>	Im Gesamt-Platzbedarf unterscheiden sich die beiden Typen nicht wesentlich. Für die Zweifeldspeicherlösung ist es vorteilhaft, wenn eine gewisse Distanz zwischen den beiden Teilfeldern eingehalten werden kann.	
<b>zusätzliche Wärmequelle</b>	Bei unbalanzierter Energievorgabe zum Bilanzausgleich notwendig.	Wird zur Effizienzsteigerung im Heizbetrieb eingesetzt. Bei ausreichend hohem Kältebedarf auf niedrigem Temperaturniveau gegebenenfalls gar nicht notwendig.

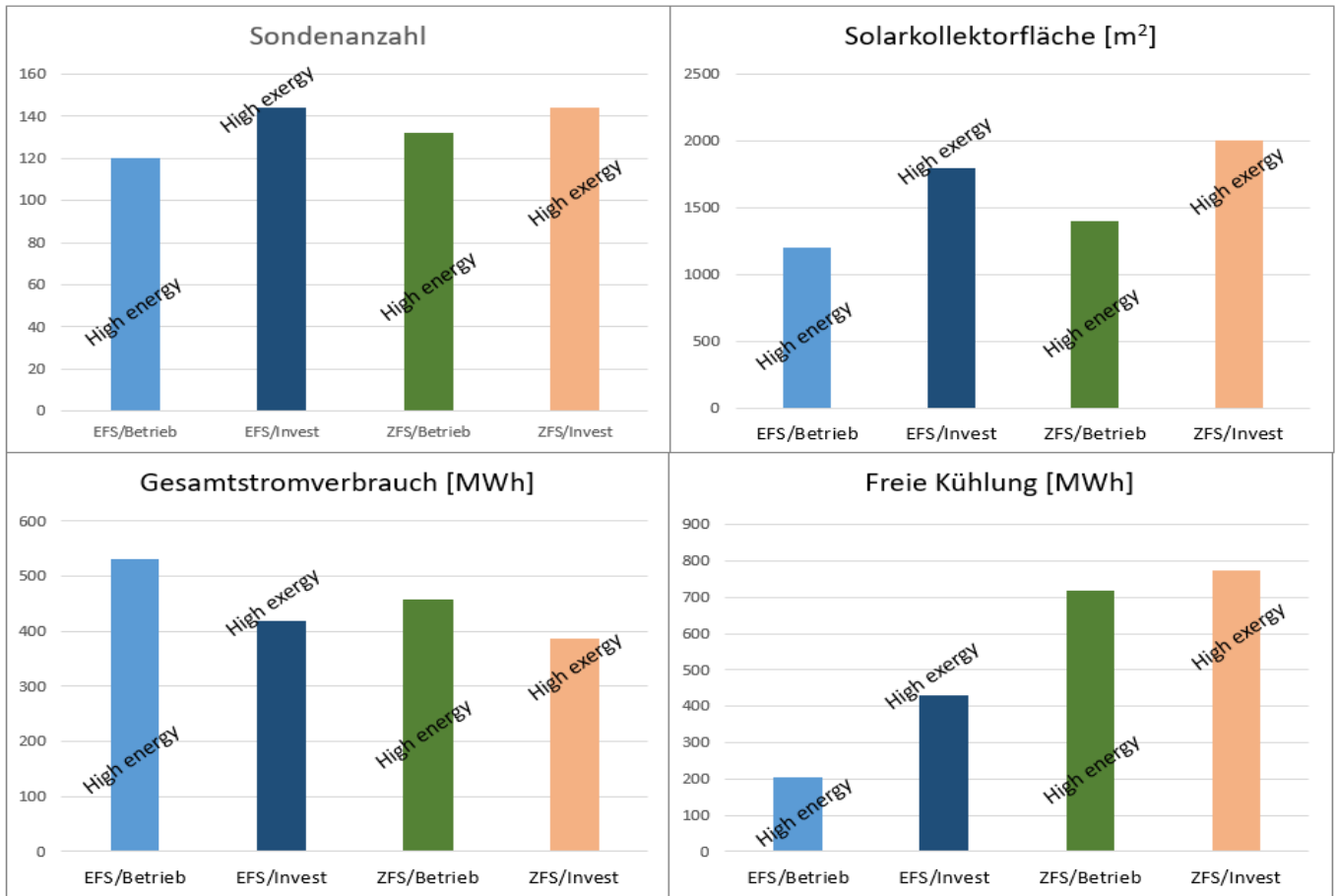


Abbildung 42: Vergleich der Sondenfeldgröße, der Solarkollektorfläche, des Stromverbrauchs und der freien Kühlung der vier Varianten (EFS = Einfeldspeicher, ZFS = Zweifeldspeicher, Invest = investitionslastige Variante, Betrieb = betriebslastige Variante).

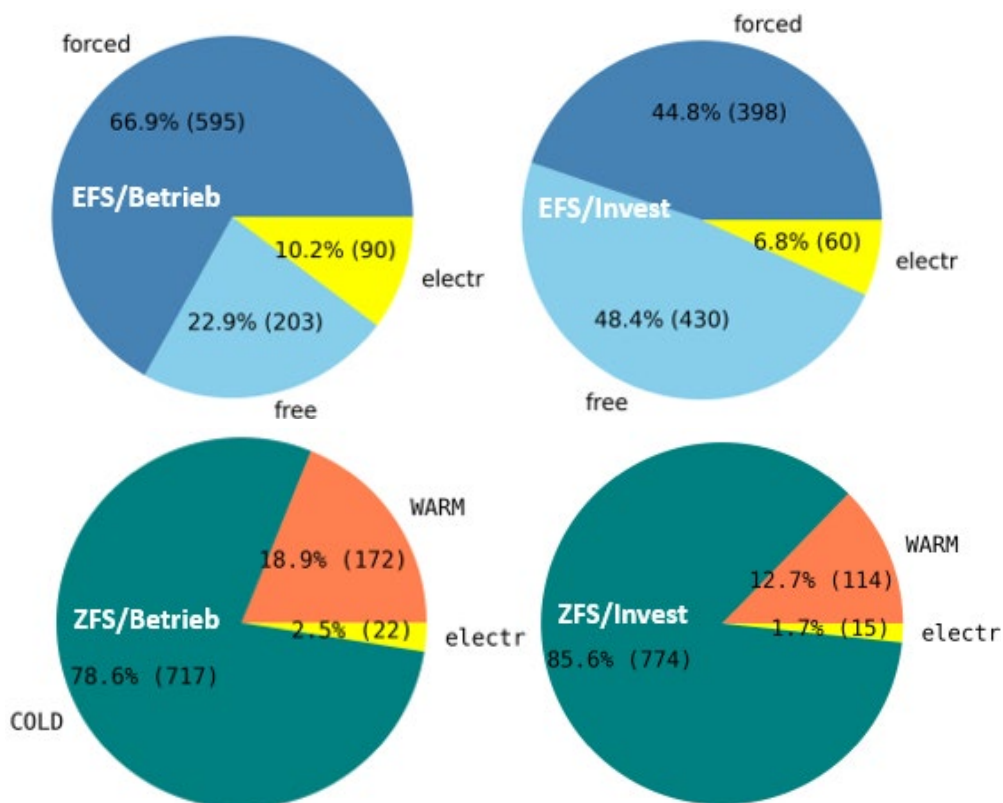


Abbildung 43: Anteile der Systemkomponenten an der Kühlung (WARM – Warmes Feld, COLD – Kaltes Feld, electr – Strom, EFS = Einfeldspeicher, ZFS = Zweifeldspeicher, Invest = investitionslastige Variante, Betrieb = betriebslastige Variante).

## **7 Ausblick und Empfehlungen**

Die Grundlagen für die reale Umsetzung eines Zweifeldspeichers bezüglich Planung und Dimensionierung wurden in der gegenständlichen Forschungsarbeit erarbeitet. Weiterführender Forschungsbedarf besteht in der Optimierung der Betriebsweise. Diese wurde nicht näher untersucht, da sie stark vom tatsächlichen Bedarfsprofil der Nachfrageseite abhängig ist. Die Aspekte der Optimierung der Betriebsweise sollen im Rahmen eines Umsetzungsprojekts erörtert werden, wenn auch das Bedarfsprofil und die konkreten technischen Komponenten bekannt sind.

Das Konzept „Zweifeldspeicher“ wird im Rahmen des ebenfalls von der FFG geförderten Projekts „Multi-WP - Hocheffiziente multivalente Wärmepumpenkonzepte zur thermischen Nutzung von Außenluft mit geothermischer Speicherung“ weiterentwickelt. Das Projekt Multi WP wird unter der Federführung der Österreichischen Energieagentur unter Beteiligung der GeoSphere Austria durchgeführt. Dort werden mehrere konkrete Fallstudien auf die Möglichkeit des Einsatzes eines Multi-WP Systems untersucht. Eine dieser Fallstudien ist das Naturhistorische Museum in Wien (NHM). Dort stehen zwei Innenhöfe für die Speicherung von Heiz- und Kühlenergie zur Verfügung, ein Einsatz des Zweifeldspeicherkonzepts bietet sich geradezu an. In diesem Projekt wird das Zweifeldspeicherkonzept an einer realen Fallstudie für den konkreten Standort näher betrachtet und der Umsetzung noch ein Stück nähergebracht.

Das im Projekt eingesetzte Script ist mit python (py-g) in einer open-source Umgebung entwickelt und somit auch für die Implementierung in eine Anlagensteuerung mit modellprädiktiver Regelung gerüstet. Das Programm kann künftig als Kernstück eines digitalen Zwillings einer Wärmeversorgungsanlage dienen.

## 8 Literaturverzeichnis

- Austrian-Standards. (2020). *ÖNORM EN 17522, Entwurf*. Vienna.
- Cimmino, M., & Cook, J. (2022). pygfunction 2.2: New features and improvements in accuracy and computational efficiency. *IGSHPA Research Track*, 45–52.  
<https://doi.org/10.22488/okstate.22.000015>
- Eskilson, P. (1987). *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Doctoral Thesis*. University Lund.
- Haslinger, E., Friedrich, R., Vana, V., Turewicz, V., Götzl, G., Ponweiser, K., et al. (2021). SANBA – Development of a low-temperature heating and cooling grid for the future, Smart Anergy Quarter Baden. Österreich: 2. Ausschreibung Vorzeigeregion Energie der FFG. Abgerufen von <https://projekte.ffg.at/projekt/3089754>
- ÖWAV. (2009). ÖWAV-Regelblatt 207 Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds - Heizen und Kühlen. Wien: ÖWAV.
- SIA. (2010). SIA 384/6 - Erdwärmesonden. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA).

## 9 Kontaktdaten

Mag. Stefan Hoyer  
GeoSphere Austria, Standort Neulinggasse  
Neulinggasse 38, 1030 Wien  
+43 1 7125674 – 6365  
stefan.hoyer@geosphere.at  
www.geosphere.at

Mag. Martin Fuchsluger  
Cornelia Steiner MSc.  
Mag. Doris Rupprecht  
Eszter Nyéki, MSc.  
**GeoSphere Austria**

DI Dr. Edith Haslinger  
DI Dr. Michael Lauermann  
**Austrian Institute of Technology**

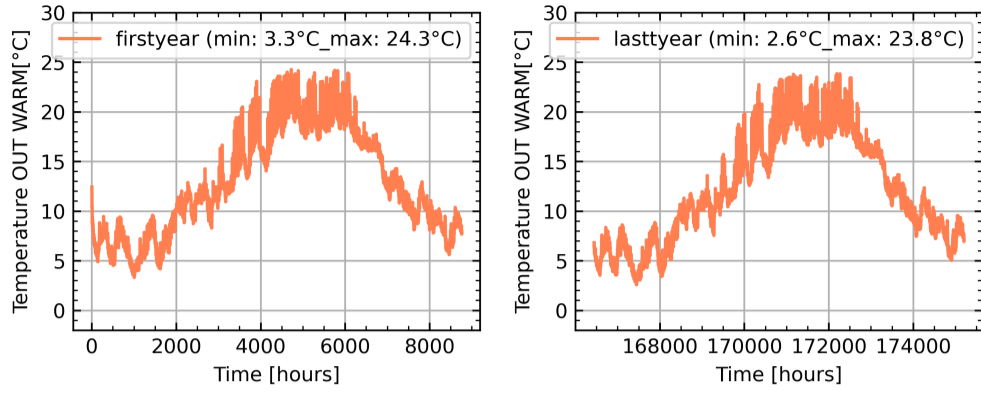
Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Biermayr  
**ENFOS**

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl Ponweiser  
Dipl.-Ing. Viktoria Illyes  
Dipl.-Ing. Florian Heindl  
Stephan Hirschler  
**TU Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik**

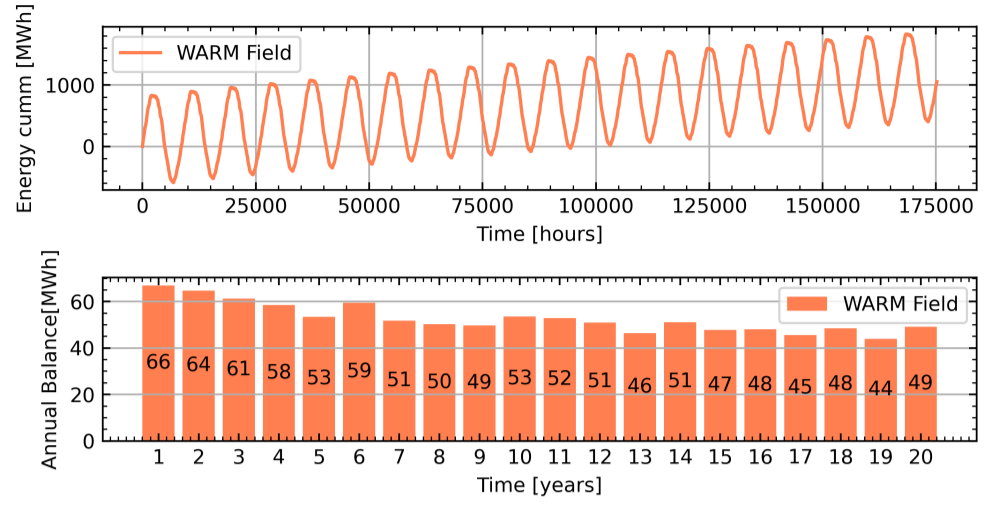
## **10 Anhang 1**

# Variante: EFS/Invest

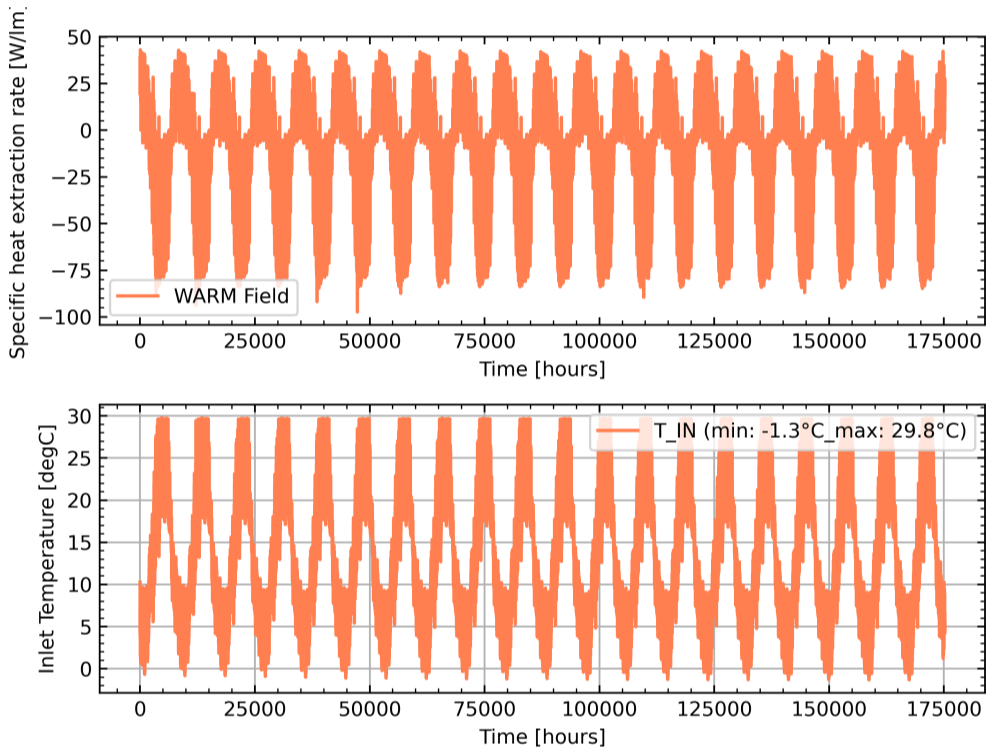
(a) Rücklauftemperaturen der Sondenfelder im 1. (links) und 20. (rechts) Betriebsjahr



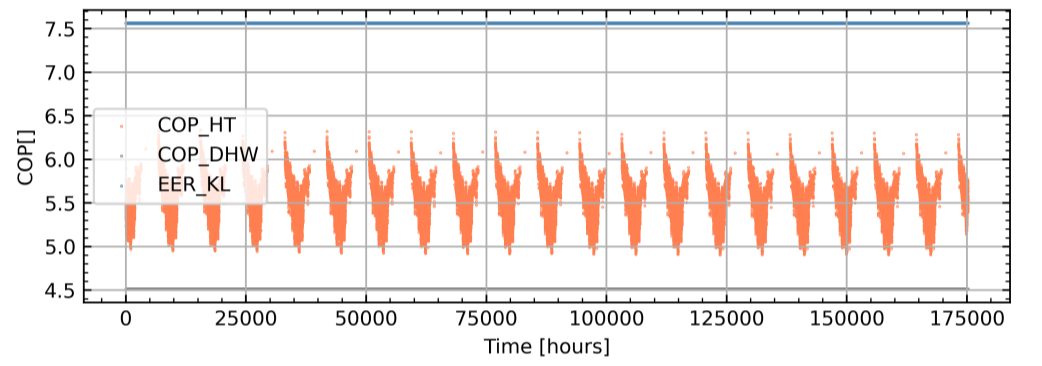
(b) Kumulative Energiemengen und Jahresbilanzen der Sondenfelder



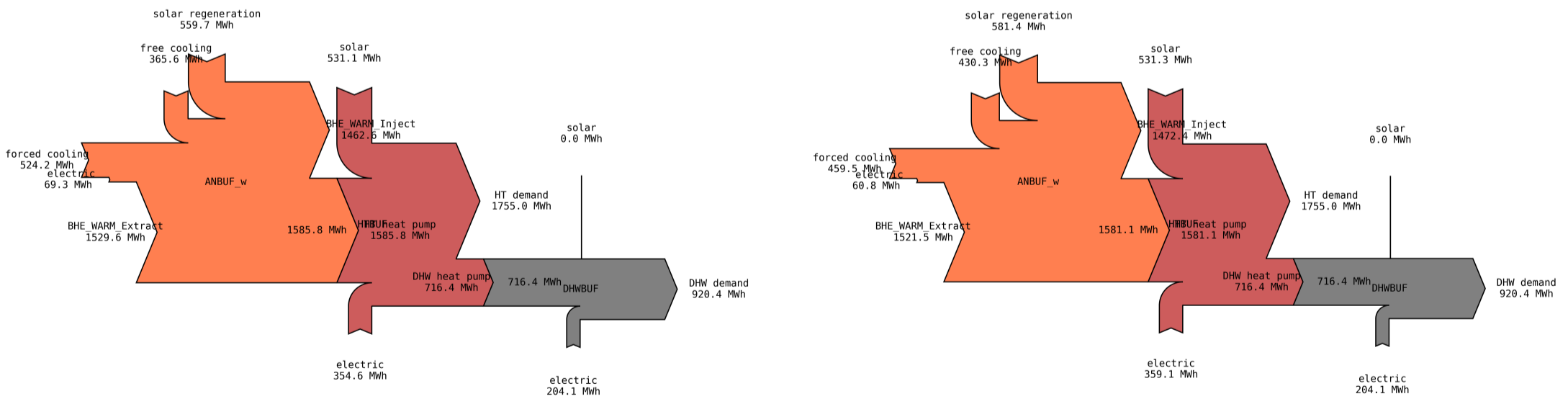
(c) Spezifischer Wärmeentzug und Vorlauftemperatur des warmen Feldes



(d) COP der Wärmepumpen (HT – Heizen, DHW – Warmwasser, EER-KL - Saisonale Energieeffizienz der HT Wärmepumpe im Kühlbetrieb)

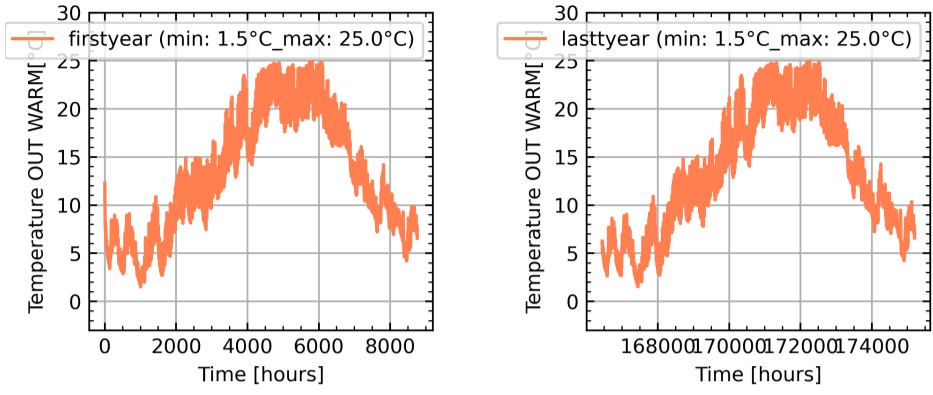


(e) Energiefluss Diagramm des 1. (links) und 20. (rechts) Betriebsjahres

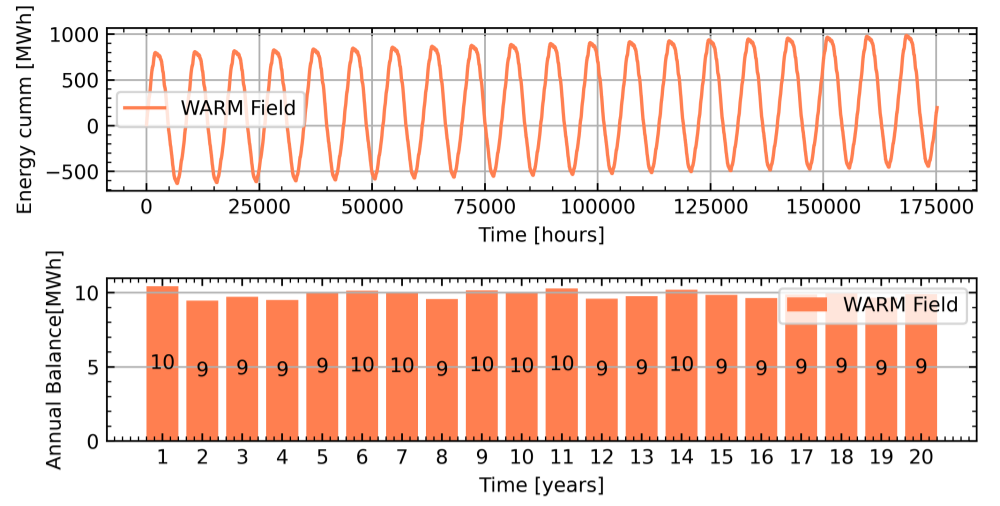


# Variante: EFS/Betrieb

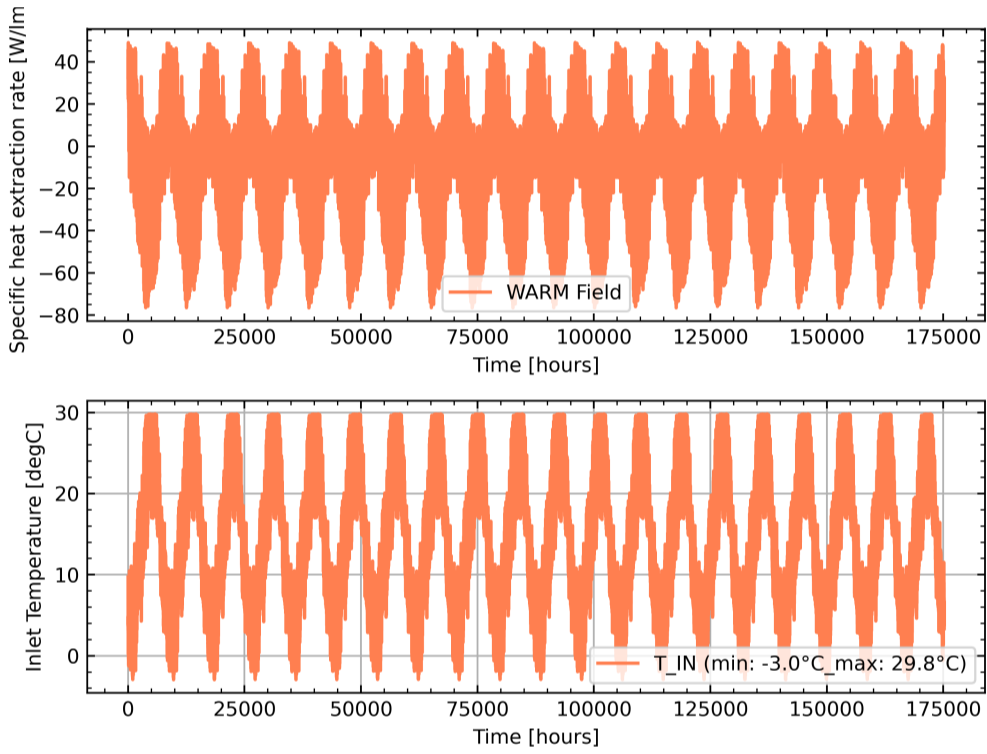
(a) Rücklauftemperaturen der Sondenfelder im 1. (links) und 20. (rechts) Betriebsjahr



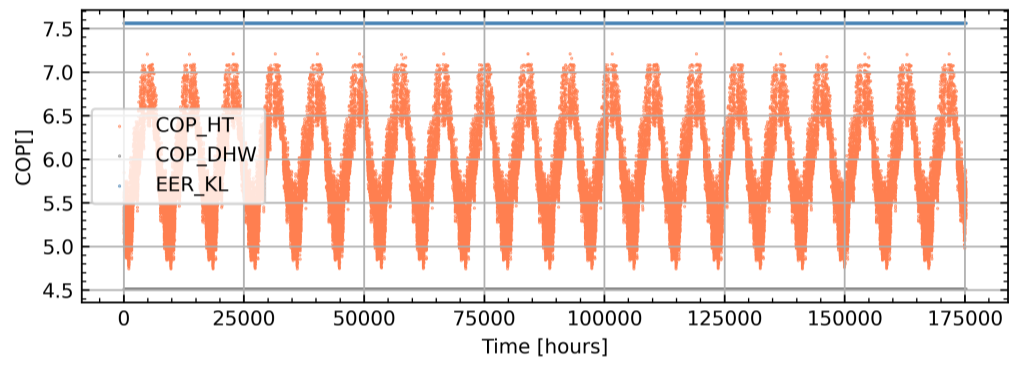
(b) Kumulative Energiemengen und Jahresbilanzen der Sondenfelder



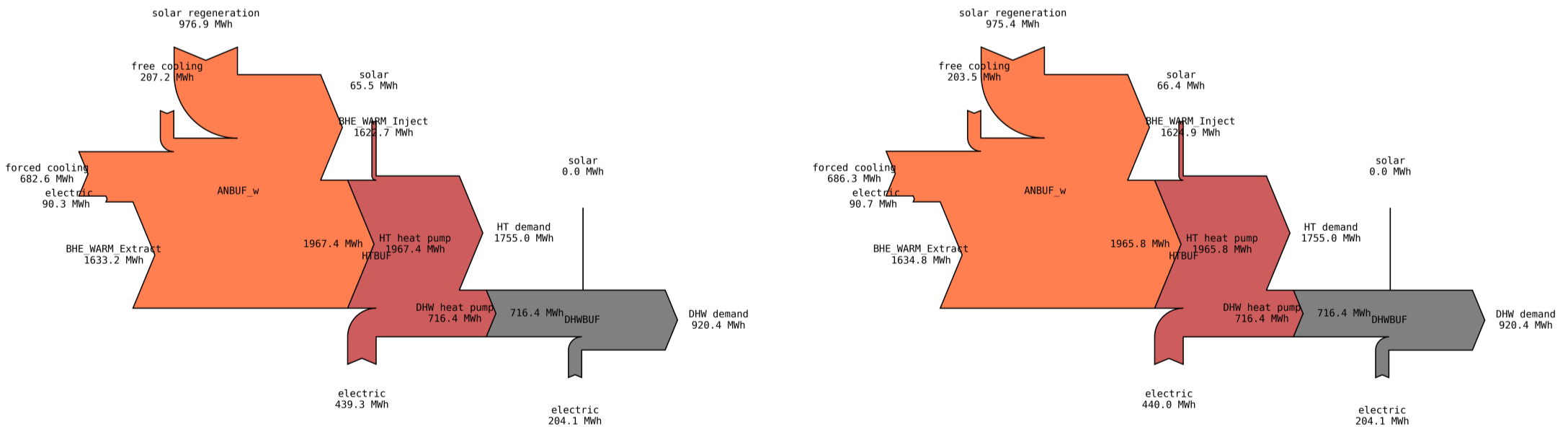
(c) Spezifischer Wärmeentzug und Vorlauftemperatur des warmen Feldes



(d) COP der Wärmepumpen (HT – Heizen, DHW – Warmwasser, EER-KL - Saisonale Energieeffizienz der HT Wärmepumpe im Kühlbetrieb)



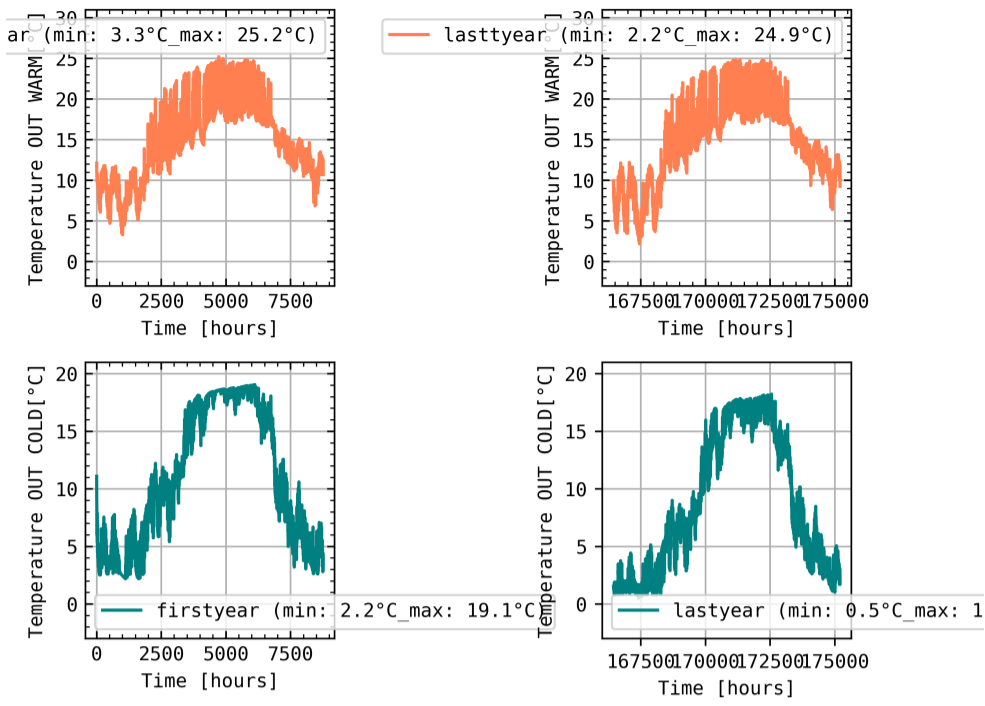
(e) Energiefluss Diagramm des 1. (links) und 20. (rechts) Betriebsjahres



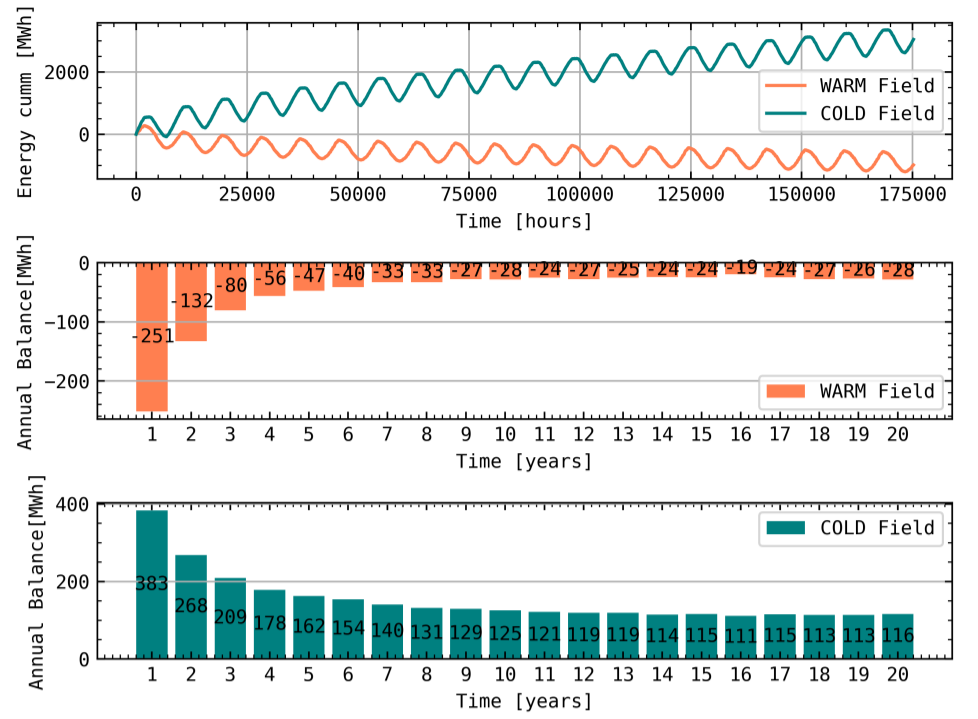


# Variante: ZFS/Invest

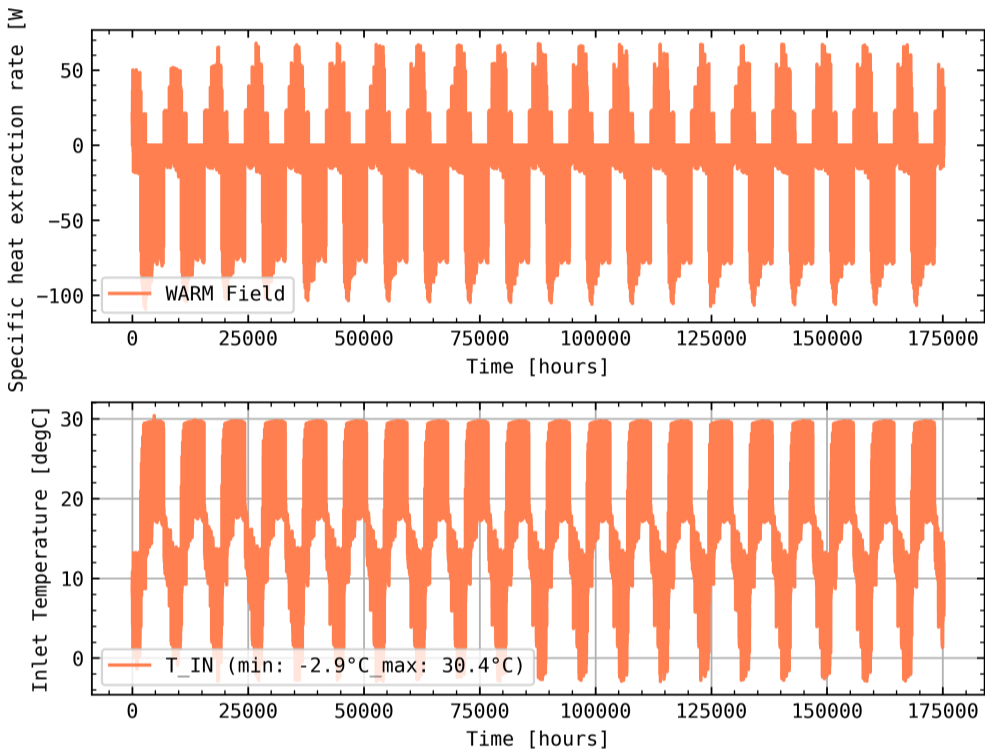
(a) Rücklauftemperaturen der Sondenfelder im 1. (links) und 20. (rechts) Betriebsjahr



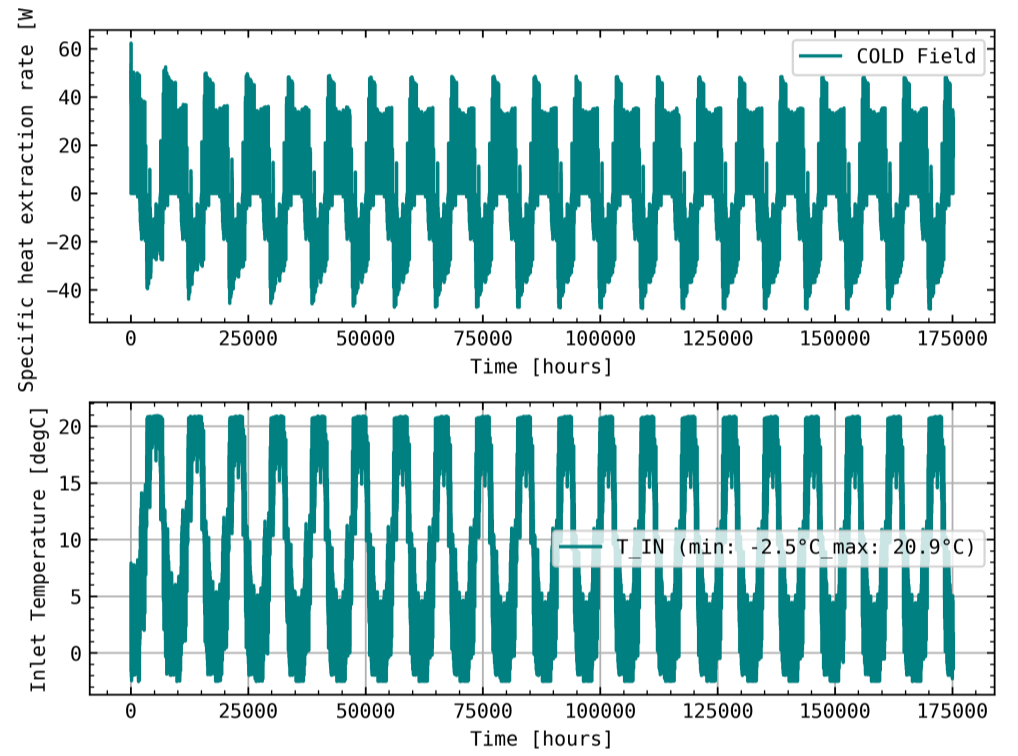
(b) Kumulative Energiemengen und Jahresbilanzen der Sondenfelder



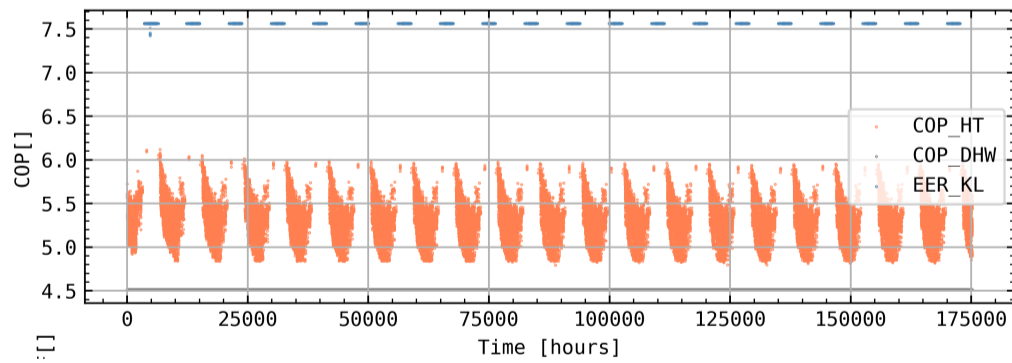
(c) Spezifischer Wärmeentzug und Vorlauftemperatur des warmen Feldes



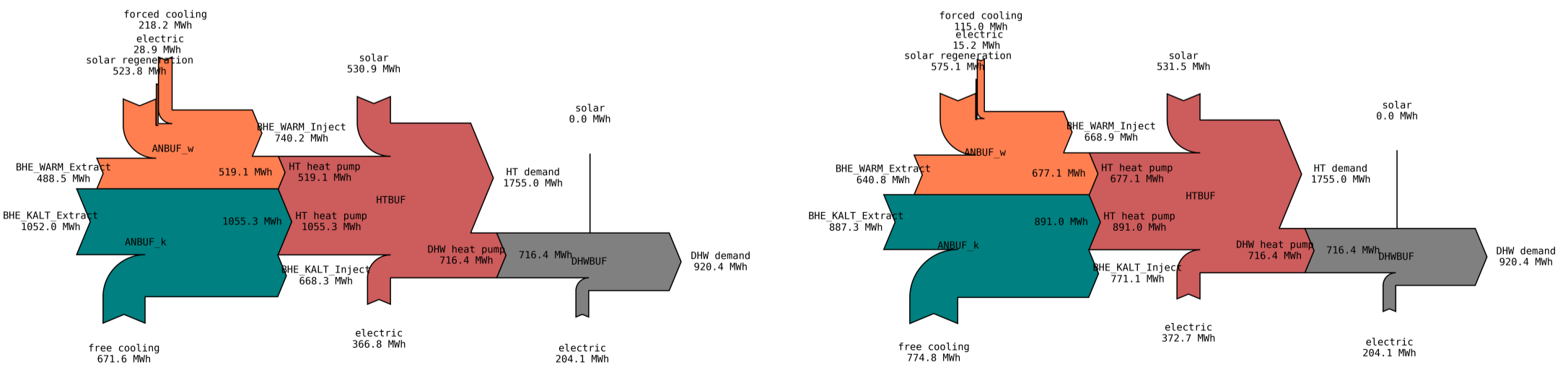
(d) Spezifischer Wärmeentzug und Vorlauftemperatur des kalten Feldes



(e) COP der Wärmepumpen (HT – Heizen, DHW – Warmwasser, EER-KL - Saisonale Energieeffizienz der HT Wärmepumpe im Kühlbetrieb)

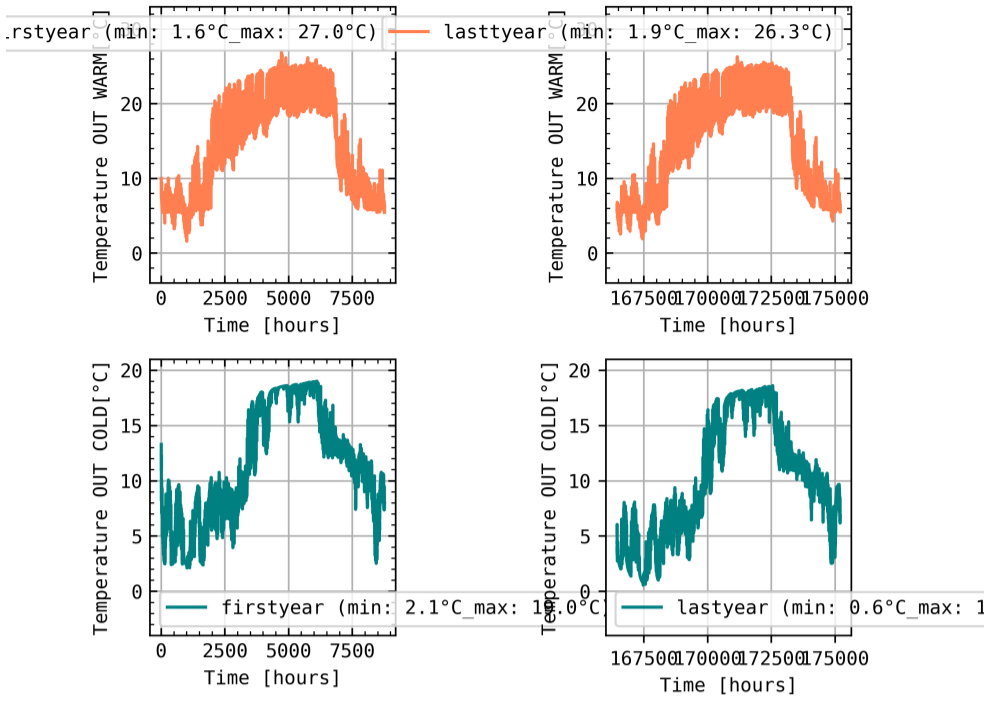


(f) Energiefluss Diagramm des 1. (links) und 20. (rechts) Betriebsjahres

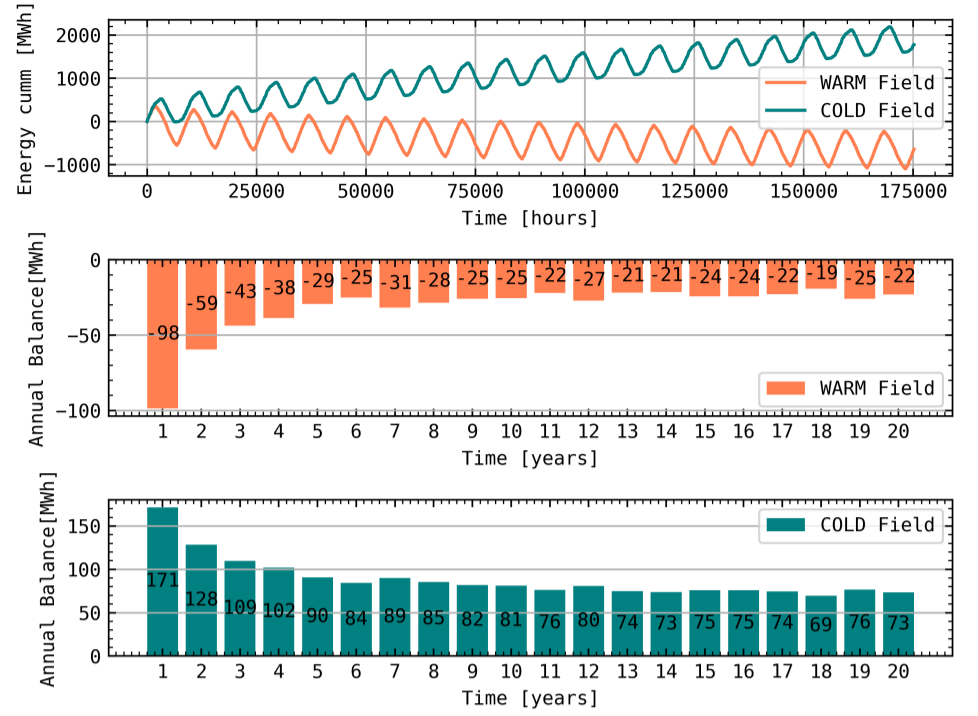


# Variante: ZFS/Betrieb

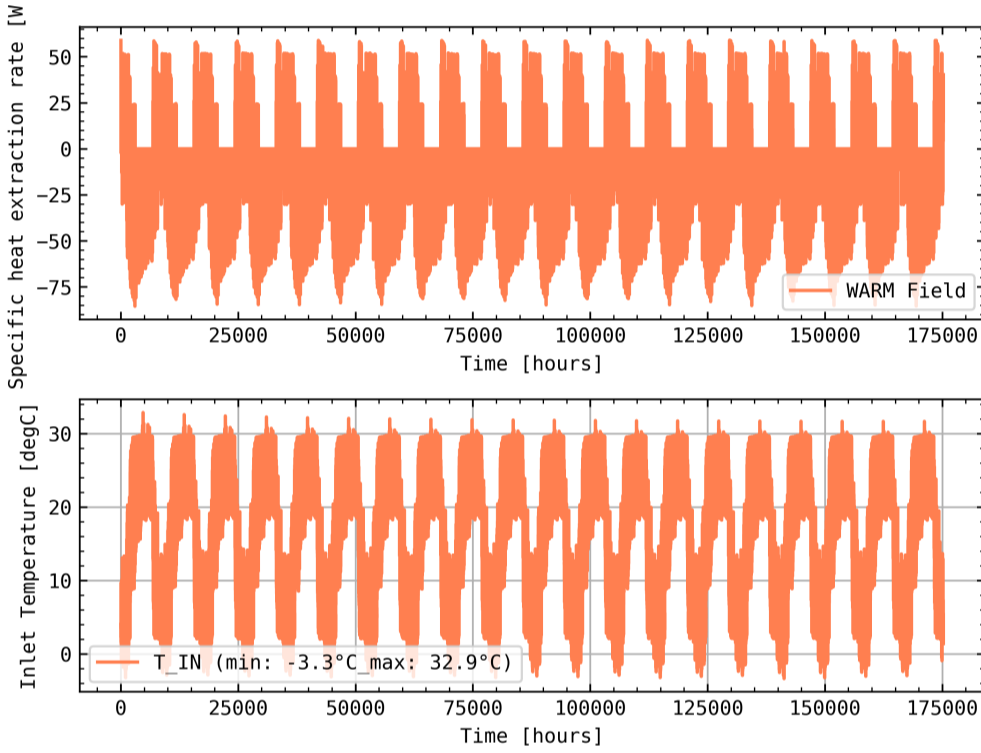
(a) Rücklauftemperaturen der Sondenfelder im 1. (links) und 20. (rechts) Betriebsjahr



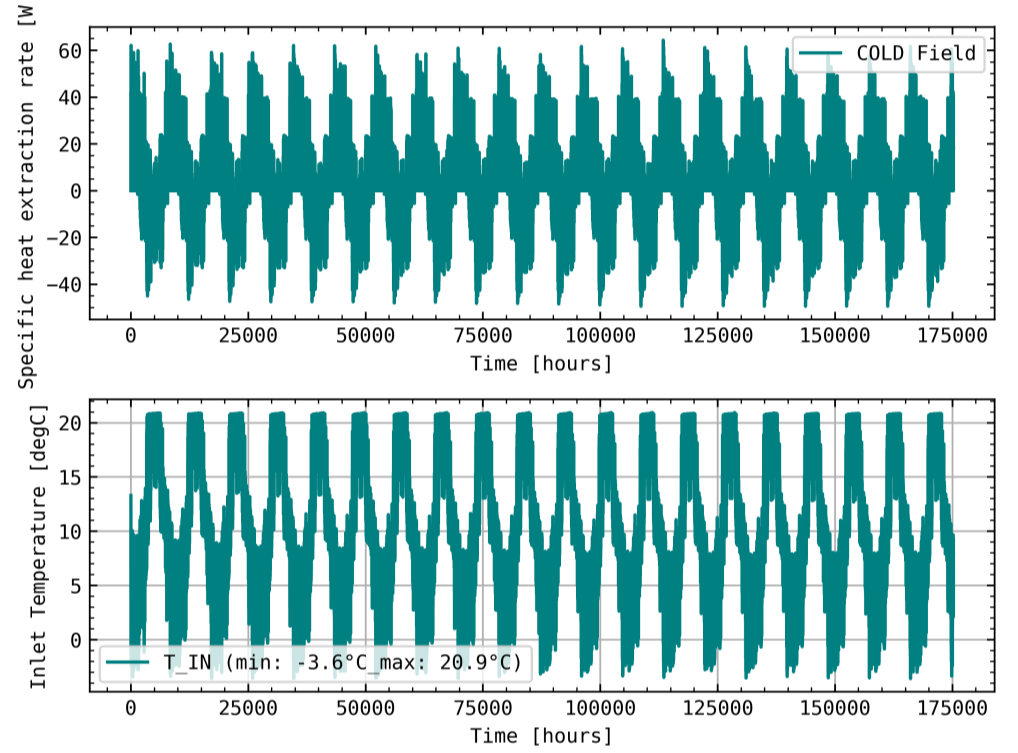
(b) Kumulative Energiemengen und Jahresbilanzen der Sondenfelder



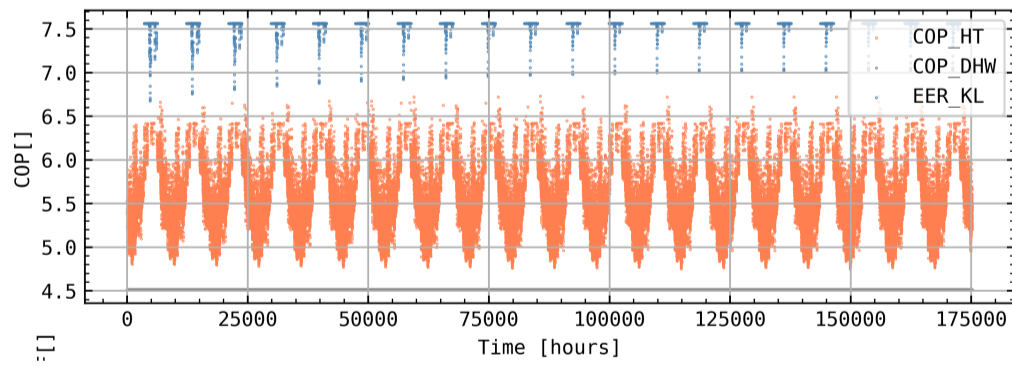
(c) Spezifischer Wärmeentzug und Vorlauftemperatur des warmen Feldes



(d) Spezifischer Wärmeentzug und Vorlauftemperatur des kalten Feldes



(e) COP der Wärmepumpen (HT – Heizen, DHW – Warmwasser, EER-KL - Saisonale Energieeffizienz der HT Wärmepumpe im Kühlbetrieb)



(f) Energiefluss Diagramm des 1. (links) und 20. (rechts) Betriebsjahres

