https://doi.org/10.5281/zenodo.18300219

Beitrag “Der Geothermiekongress DGK 2025”, 18.-20. November 2025

Saisonale Wärmespeicherung in kalten Nahwärmenetzen – Techno-ökonomische Analyse ausgewählter Umweltenergiequellen zur Regeneration eines Niedertemperatur-Aquiferspeichers

Luise Westphal
eZeit Ingenieure GmbH

Keywords: NT-ATES, Horithermie, kalte Nahwärme, Simulation, Bestandsgebäude

Zusammenfassung

Im Rahmen der Masterarbeit an der Berliner Hochschule für Technik wurde die Errichtung eines kalten Nahwärmenetzes zur potentiellen Wärmeversorgung eines Bestandsgebäude-Quartiers in Berlin-Kreuzberg untersucht. Als primäre Energiequelle des Wärmenetzes wurde oberflächennahe Geothermie (Grundwasser) gewählt. Die Masterarbeit umfasste die Ermittlung der anliegenden Wärmebedarfe, die Auslegung des kalten Wärmenetzes inkl. Erschließung der Umweltenergiequellen und eine techno-ökonomische Analyse des Gesamtsystems. Das Softwaretool Leanheat® Network der Danfoss GmbH wurde genutzt, um die Energieflüsse im Jahresverlauf zu simulieren. Als primäre Energiequelle wurde ein Horizontalfilterbrunnen ausgelegt, welcher einen Niedertemperatur-Aquiferspeicher (NT-ATES) zur saisonalen Wärmespeicherung erschließt. Innerhalb verschiedener Szenarien wurden drei verschiedene Umweltenergiequellen zur Regeneration des NT-ATES bewertet: Solare Energie (PVT-Anlagen), Außenluft (Luftrückkühler) und Abwasserwärme (Druckleitung-Wärmetauscher). Es wurden die Wärmegestehungskosten der jeweiligen Szenarien gebildet und verglichen. Des Weiteren wurden Stromverbrauch, ATES-Energiebilanz und technische Parameter wie die Netzdimensionierung auf Basis der Simulationsergebnisse ausgewertet.

1. Einleitung

Der Gebäudesektor nimmt in Deutschland 28 % des nationalen Gesamtendenergieverbrauchs ein (Dena, 2023). Eine emissionsreduzierte und effizientere Wärmeversorgung bietet sich durch den Aufbau von Wärmenetzen der 5. Generation, sog. „5th Generation District Heating and Cooling“ (5GDHC) bzw. kalten Nahwärmenetzen oder Kaltnetzen an. Erschließbare Energiequellen zur Speisung von 5GDHC umfassen u. a. offene (grundwasserbasierte) geothermische Lösungen. Werden hohe Entzugsleistungen benötigt und sind die Platzverhältnisse eingeschränkt, eignen sich ebenfalls Horizontalfilterbrunnen (HBr), eine bewährte Technik zur Grundwasserförderung (Houben et al., 2022). Die jahreszeitliche Inkongruenz zwischen Wärmebedarf in Gebäuden und Bereitstellung von Umweltenergien kann durch saisonale Wärmespeicherung überbrückt werden und ist für den effizienten Betrieb eines 5GDHC Netzes ausschlaggebend (Boesten et al., 2019). Die Nutzung von grundwasserbasierten saisonalen Wärmespeichern (Aquifer Thermal Energy Storage, ATES) eignet sich aufgrund der thermischen Eigenschaften des Grundwassers (Abuasbeh et al., 2021) und der häufig sehr großen unterirdisch vorhandenen Speicherkapazität (Todorov et al., 2020) optimal.

2. Forschungsziel

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist eine techno-ökonomische Betrachtung verschiedener Umweltenergiequellen zur saisonalen Wärmespeicherung in einem NT-ATES. Der NT-ATES wird durch einen HBr erschlossen und in Verbindung mit einem kalten Nahwärmenetz betrieben,

welches für ein Bestandsquartier in Berlin-Kreuzberg ausgelegt wird. Innerhalb von drei Szenarien werden verschiedene Umweltenergiequellen für den Wärmeeintrag im Rahmen der saisonalen Speicherung betrachtet. Es wird die Energiebilanz zwischen Energieaustrag aus dem ATES zur Deckung des Bedarfs der Verbraucher und Energieeintrag in den ATES durch die Umweltenergien bewertet. Die ausgewählten Umweltenergiequellen sind:

- Szenario 1: Abwasserwärme,
- Szenario 2: Außenluft (erschlossen durch Luftrückkühler (LRK)) und
- Szenario 3: Solarthermie (erschlossen durch Photovoltaik-Thermie (PVT)-Module).

Die zu beantwortenden Forschungsfragen sind:

I. Wie wirkt sich die Nutzung eines Niedertemperatur-Aquiferspeicher auf den Betrieb eines kalten Nahwärmenetzes aus?
II. Welche zur saisonalen Wärmespeicherung erschließbaren Umweltenergiequellen minimieren die Wärmegestehungskosten eines kalten Nahwärmenetzes?

3. Methodik

Der Betrieb des kalten Nahwärmenetzes wird mithilfe der thermohydraulischen Modellierungssoftware Leanheat® Network (LHN) der Danfoss GmbH untersucht. Grundlagen und Eingangsparameter werden standortspezifisch und stundengenau aufgestellt und der Betrieb des Netzes im Jahresverlauf simuliert. Im Rahmen der Auswertung werden die technischen Komponenten des kalten Nahwärmenetzes dimensioniert und mit Investitions-, Wartungs- bzw. Instandsetzungs- und Betriebskosten versehen. Die Wärmegestehungskosten werden für einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren auf Basis einer dynamischen Investitionsrechnung gebildet.

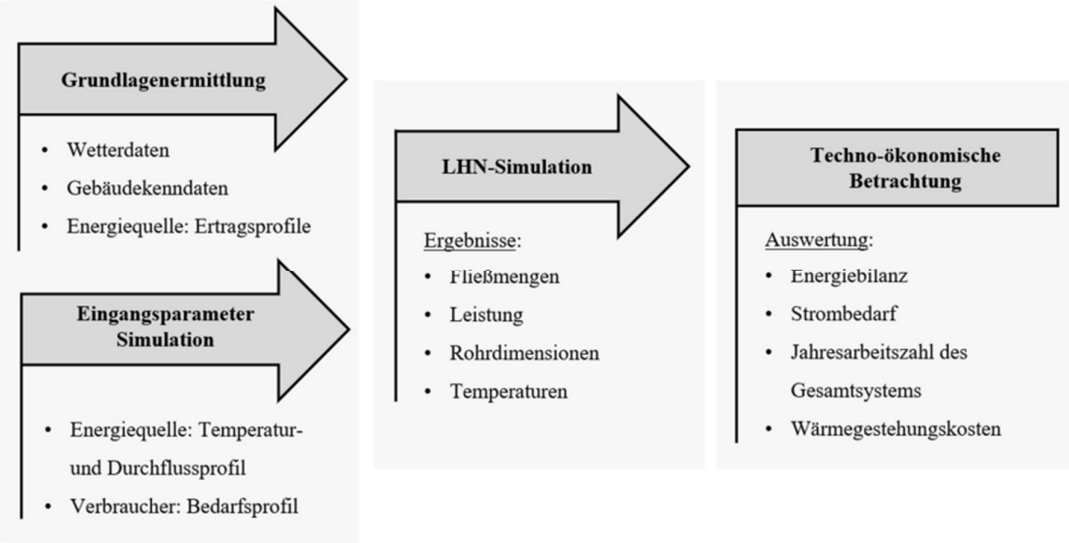


Abb. 1: Angewandte Methodik (Eigene Darstellung)

3.1 Systemaufbau

Das betrachtete System besteht aus dem saisonalen Wärmespeicher, dem Verteilnetz und Hausstationen. Die Energiezentralen im Gebäude werden durch Hausanschlussleitungen vom Verteilnetz versorgt. Der saisonale Untergrundwärmespeicher, der ATES, wird durch einen HBr erschlossen. In der Brunnenanlage wird Grundwasser durch eine Brunnenpumpe gefördert und als primäre Energiequelle des Kaltnetzes genutzt. Die Brunnenanlage ist durch einen Wärmetauscher (WT) hydraulisch vom Verteilnetz getrennt. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Kaltnetz als Trasse bestehend aus Vorlaufleiter (VL) und Rücklaufleiter (RL) definiert. Zur Vereinfachung der Simulation wird fixiert, dass Verbraucher ihren Energiebedarf durch den VL decken, während der Wärmeeintrag zur saisonalen Speicherung in den ATES in den RL einfließt. Eine Hausstation wird ohne hydraulische Trennung durch Hausanschlussleitungen mit dem Verteilnetz verbunden. Dezentrale Umwälzpumpen (dez. UP) in den Hausstationen fördern das Wärmeträgermedium des Verteilnetzes, um dieses als Quelle für die Wärmepumpen (WP) zu nutzen. Die Hausstation stellt den Bilanzraum des Energiebedarfs der Verbraucher dar.

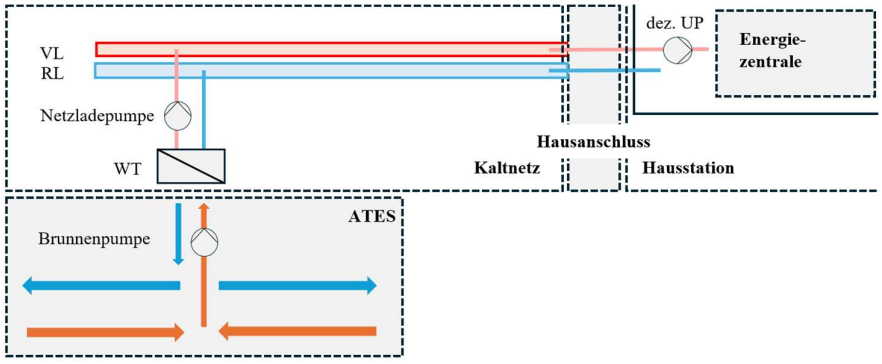


Abb. 2: Bilanzgrenzen des betrachteten Systems

3.2 Simulation in LHN

LHN wird zur Simulation von thermischen und hydraulischen Zuständen in Fernwärme- und Fernkältenetzen eingesetzt. Die Berechnungen basieren auf der Simulierung des Netzes, zusammengestellt aus Rohrleitungen, Erzeugerquellen, Verbraucher, Wärmeübertrager, Pumpen, Ventile, Wärmespeicher etc. (Danfoss GmbH, o. D.). Die Grenzbedingungen zum Aufsetzen einer LHN-Simulation umfassen den Einsatz der Objekte „Werk“, „Verbraucher“ und „Knoten“, jeweils verbunden durch Rohrleitungen. VL und RL sind prinzipiell getrennt, es sei denn, ein Bypass wird definiert. Die übertragenen Leistungen an den jeweiligen Objekten errechnen sich anhand der anliegenden Temperaturdifferenz, der Wärmekapazität und der Fließmengen. Fließmengen im Netz werden prinzipiell durch den Bedarf der Verbraucher erzeugt. Weitere festzulegende Rahmenparameter der Simulation sind Rohreigenschaften und ein fixierter Wert für die Umgebungstemperatur. Der Durchmesser der Rohrleitungen kann anhand einer festgelegten maximalen Durchflussgeschwindigkeit durch die Simulation ermittelt werden.

3.2.1 Verbraucher

Die Hausstation wird in LHN als Verbraucher-Objekt hinterlegt, welches mit dem Hauptverteilnetz über eine Hausanschlussleitung verbunden ist. Vor jedem Verbraucher-Objekt ist ein Pumpen-Objekt hinterlegt, um die dez. UP abzubilden. Das Pumpen-Objekt ist über die Druckänderung im

Verbraucher-Objekt definiert. Die Eingangsparameter für das Verbraucher-Objekt sind der Bedarfslastgang und die primärseitige Temperaturspreizung der WP. Der hinterlegte Bedarfslastgang beschreibt die notwendige Energie, die das Kaltnetz liefern muss, um den thermischen Leistungsbedarf der Verbraucher zu decken. Der thermische Leistungsbedarf der Verbraucher setzt sich durch die Deckung von Heizwärme und Warmwasser zusammen. Die jährlichen Bedarfe werden flächenbezogen[1] ermittelt. Die Verteilung über 8760 h erfolgt für Heizwärme nach den ortspezifischen Heizgradstunden (DWD, 2017) und für Warmwasser als wöchentliches Zapfprofil (VDI 6002-1). Es wird für alle Gebäudekomplexe eine einheitliche Funktionsweise der Energieerzeugung festgelegt, auf deren Basis die Belastung des Kaltnetzes durch die WP als Stundenprofil aufgestellt wird. Dabei wird u. a. Wärmerückgewinnung aus der Abluft, der Einsatz von Wärmespeichern bei unterschiedlichen Temperaturanforderungen und eine Warmwasservorrangschaltung berücksichtigt. Ergänzend zu den WP wird ein elektrischer Spitzenlasterzeuger eingesetzt. Im PVT-Szenario wird bei der Aufstellung des Bedarfsprofil angesetzt, dass die thermische Energie der PVT-Module aufgrund der vorteilhaften Temperaturniveaus primär zur Deckung des Energiebedarfs der jeweiligen Hausstation genutzt wird.

3.2.1 Primäre Energiequelle

Als primäre Energiequelle muss ein Werk-Objekt definiert werden, welches Energie in das System einträgt. Das Werk stellt den Einfluss des Brunnens netzseitig, d. h. hinter dem WT dar, die Fahrweise des Brunnens wird somit nicht abgebildet. Um den Wärmeeintrag dem System wieder zu entziehen (Wärmeeinspeicherung in den ATES), wurde das Werk-Objekt mit einem Nachwärmer-Objekt kombiniert. Das Nachwärmer-Objekt erzeugt eine vordefinierte Temperatur, sobald es durchströmt wird. Das zu hinterlegende Temperaturprofil bestimmt die Netz-VL-Temperatur der Simulation. Wärmeeintrag bzw. -austrag in den ATES wird in der Simulation anhand Temperaturdifferenz und Durchfluss am Nachwärmer-Objekt errechnet. Der ATES wird als Blackbox betrachtet unter der Annahme, dass ausreichend Speicherkapazität vorliegt. Die standortspezifischen hydrogeologischen Eigenschaften und ihre Auswirkung auf den Speicherbetrieb werden nicht berücksichtigt. Es wird eine sinusförmige Temperaturschwankung im Jahresverlauf angenommen, nach Buffa et al. (2019) ist dies repräsentativ für den Temperaturverlauf in einem kalten Nahwärmenetz. Die durchschnittliche Grundwassertemperatur als ungestörter Ausgangswert der Sinusschwankung wird nach Auswertungen des Berliner Geoportals standortspezifisch ermittelt. Die Temperaturschwankung um diesen Ausgangswert ergibt sich anhand der Temperaturspreizung, mit welcher das Grundwasser durch Energieeintrag erwärmt oder durch Energieaustrag abgekühlt wird. Es wird eine Spreizung von 3 K gewählt. Es wird angenommen, dass die ungestörte Ausgangstemperatur zum Anfang der Heizperiode bereitsteht bzw. durch den Wärmeeintrag zu diesem Zeitpunkt wiederhergestellt wird. Das Temperaturprofil im Netz-VL verläuft parallel zur Grundwassertemperatur, abzgl. der Grädigkeit des WT zur Einbindung der Brunnenanlage in das Kaltnetz.

3.2.2 Regenerationsquellen

Um den Eintrag der Umweltenergie zur Regeneration des ATES im Wärmenetz nachzustellen, wird ein Nachwärmer-Objekt in Kombination mit einem Pumpen-Objekt eingesetzt. Eingangsparameter sind ein Temperaturprofil (Nachwärmer-Objekt) und ein Durchflussprofil (Pumpen-Objekt). Es wird für alle Regenerationsquellen einheitlich angenommen, dass der Netz-VL um maximal 3 K durch Energieeintrag erhöht werden kann. Der Durchfluss berechnet sich anhand der einzutragenden

[1] gebäudespez. Heizwärmebedarf, Warmwasser nach DIN/TS 18599-12

Energiemengen und der Temperaturdifferenz zwischen Netz-VL und Netz-RL nach Einspeisung der Umweltenergie.

- Abwasser: Die theoretische Entzugsleistung des Abwasserwärmetauschers lässt sich nach Abwasserwärmeatlas der Berliner Wasserbetriebe (BWB) für das Projektgebiet bestimmen. Im Winter liegen die Temperaturen des Abwassers bei 12 – 15 °C, während im Sommer Temperaturen von 17 – 20 °C zu erwarten sind (Gürtler et al., 2022). Die real anliegenden Temperaturen müssen standortspezifisch anhand von Messungen ermittelt werden. Aufgrund der fehlenden Datengrundlage wird eine negative Kosinusfunktion verwendet, um die saisonale Schwankung der Abwassertemperatur näherungsweise darzustellen. Als niedrigste Temperatur wird zum Jahresanfang und -ende 13 °C hinterlegt, während zur Jahresmitte 17 °C erreicht werden.
- LRK: Der Ertrag eines LRK wird näherungsweise anhand der standortspezifischen Außenlufttemperatur (DWD, 2017) und einer beispielhaften Auslegung ermittelt.
- PVT: Bei PVT-Modulen hängt die erzeugte Wärmemenge und die Austrittstemperatur der Sole von der Eintrittstemperatur dieser und von der lokalen solaren Einstrahlung ab. Anhand einer Polysun® Simulation[2] wird der Lastgang für die thermischen Energiemengen und die Sole-Austrittstemperatur aufgestellt. Der erzeugte Lastgang wird auf die gebäudespezifische, solarthermisch nutzbare Dachfläche (lt. Berliner Energieatlas) skaliert.

3.3 Wärmegestehungskosten

Zum Vergleich der Wirtschaftlichkeit der Varianten werden für jedes Szenario die Wärmegestehungskosten (Levelized Cost of Heat, LCOH) aufgestellt. Die Berechnung orientiert sich an der VDI 2067. Als kapitalgebundenen Kosten werden jegliche Investitions- und Reinvestitionskosten zur Wärmeerzeugung, -verteilung und -bereitstellung aufgefasst. Hierfür wird die Förderung nach BEW[3] Modul 2 angesetzt. Es wird die Installation von PV-Anlagen zur Versorgung der Anlagentechnik berücksichtigt, weitere Kosten zur Umrüstung der Stromversorgung (z. B. Verstärkung der Stromleitungen, Umrüstung der Trafos, etc.) jedoch nicht. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Szenarien beizubehalten, wird die PV-Fläche für die Szenarien Abwasser und LRK der Fläche der PVT-Anlagen gleichgesetzt. Bedarfsgebundene Kosten ergeben sich nach den Vorgaben der VDI 2067 für Nutzungsdauern und Wartungs- und Instandsetzungsaufwand. Die betriebsgebundenen Kosten sind die Energiekosten durch den Einsatz von Strom. Es wird der Strombedarf in den Hausstationen berücksichtigt (Wärmeerzeugung, Lüftungskonzept), der Regenerationsquellen und deren Netzeinspeisung und des Brunnenbetriebs und dessen Netzeinbindung. Der Strombedarf in den Hausstationen wird teilweise durch die PV-Anlagen gedeckt. Der elektrische Ertrag der PV-Anlagen wird je Gebäudekomplex nach den Angaben des Berliner Energieatlas‘ ermittelt und anhand der standortspezifischen Globalstrahlung (DWD, 2017) auf den Jahresverlauf aufgeteilt. Da aufgrund der Zirkulation der Sole die PVT-Module gekühlt werden, wurde der elektrische Ertrag um 6 % (Consolar, 2024) ggü. der PV-Anlagen erhöht. Betriebsgebundene Erlöse ergeben sich durch die EEG-Einspeisevergütung der überschüssigen Strommengen und durch die vermiedenen Kosten des externen Stromzukaufs durch die Eigenversorgung. Als sonstige Kosten wird ein Planungsaufwand von pauschal 10 % angesetzt. Im Abwasserszenario entstehen zusätzlich Gebühren bei Nutzung der Abwasserwärme. Als zur Verfügung gestellter Endenergiebedarf wird sowohl der Warmwasser- als auch der Heizwärmebedarf angesetzt. Der Betrachtungszeitraum wird auf 20 Jahre gesetzt. Die Investitionen fallen jeweils im Vorjahr zu deren Nutzungsbeginn an. Nach

[2] Softwarelösung Vela Solaris AG
[3] BAFA Bundesförderung für effiziente Wärmenetze

Konstantin & Konstantin (2023) wird eine Inflationsanpassung von 2 % p. a. berücksichtigt, welche sich in dem inflationsbereinigten Kalkulationszinssatz widerspiegelt.

4. Ergebnisse & Auswertung

4.1. Projektgebiet

Das zu untersuchende Projektgebiet umfasst Liegenschaften in Berlin-Kreuzberg. Die Gebäude umfassen um die 1.400 Wohneinheiten auf etwa 110.000 m² Wohnfläche und 38 Gewerbeeinheiten auf etwa 2.700 m². Es handelt sich sowohl um alleinstehende Gebäude als auch um Teile von Gebäudekomplexen in der urbanen Blockstruktur. Der notwendige jährliche Gesamtenergiebedarf der Liegenschaften umfasst insgesamt 9,8 GWh, wovon 2,1 GWh/a für Warmwasserbereitung und 7,7 GWh/a für Heizen anfallen. Zur Vereinfachung der Simulation werden Gebäudekomplexe gruppiert und als gesammelte Netzanschlusspunkte (NAP) abgebildet. Das Kaltnetz wird als Maschennetz projiziert und entsprechend Straßenverlauf und sinnvoller Verknüpfung der NAP ausgelegt.

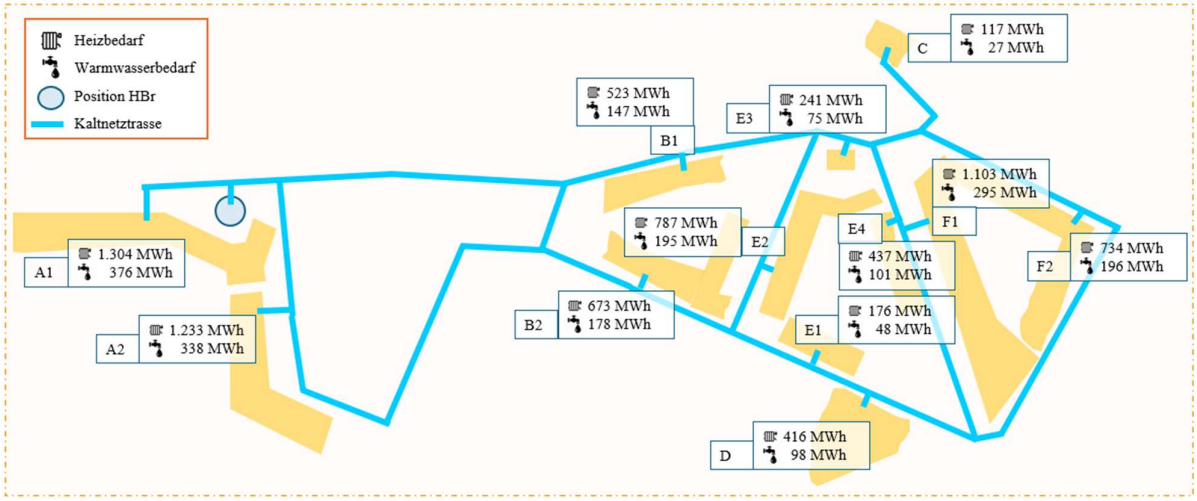


Abb. 3: Energiebedarfe im Projektgebiet

Je NAP wird entsprechend des angesetzten Konzepts die Energieerzeugung zur Deckung des Heizwärme- und Warmwasserbedarf im Jahresverlauf betrachtet. Das Profil der thermischen Leistung der WP wird basierend auf den VL-Temperaturen des Kaltnetzes und dem WP-spezifischen COP in den Umweltenergiebedarf umgerechnet. Die untenstehende Abbildung zeigt zusammengefasst für das gesamte Projektgebiet die Fahrweise der WP mit Quelle Kaltnetz.

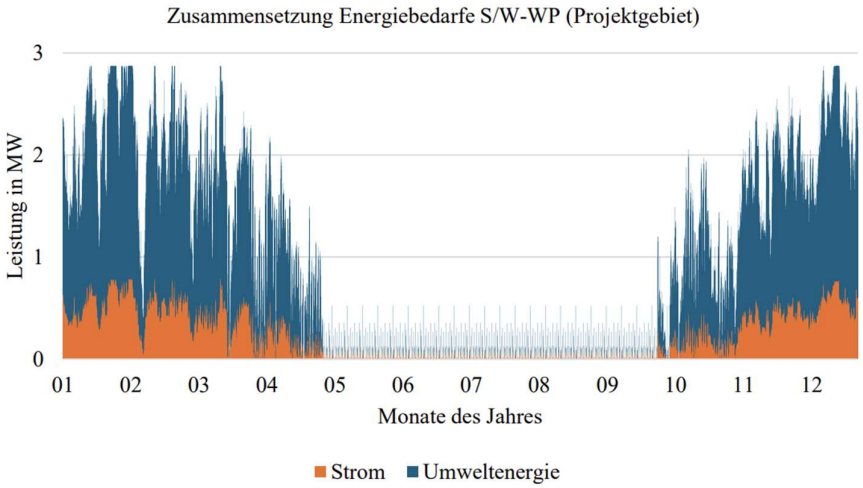


Abb. 4: Energiebedarf der WP im Projektgebiet

Im Abwasser und LRK Szenario umfassen die Umweltenergiebedarfe, die das Kaltnetz für die Verbraucher bereitstellen muss, im gesamten Projektgebiet 5,78 GWh/a. Im PVT Szenario reduziert sich aufgrund der direkten Nutzung der PVT-Wärme der Bedarf auf 5,46 GWh/a.

4.2 Simulationsergebnisse

Die Simulationen wurden in LHN je Szenario für einen Jahresverlauf durchgeführt, die Ergebnisse wurden stundenbasiert erfasst. Aus der LHN-Simulation wurden die Fließmengen in kg/s, die Temperaturen im VL und RL in °C und die anliegende Leistung in kW für die entsprechenden Objekte erfasst. Final wurden die Rohrdurchmesser in mm für die Hausanschlüsse und für das Hauptverteilnetz den Simulationsergebnissen entnommen.

4.2.1 Abwasser

Die Mindestenergie die der Abwasserwärmetauscher bei niedrigster Abwassertemperatur, d. h. in den Wintermonaten, in das Netz einträgt, umfasst 538 kW. Die Entzugsleistung steigt und fällt entsprechend der Abwassertemperaturen, bei erhöhten Abwassertemperaturen im Sommer sind bis zu 677 kW möglich. Der Volumenstrom am Brunnen-WT ist im Vergleich zu den anderen Szenarien gering, die maximale Durchflussmenge liegt durch den Energieaustrag für die Bedarfsdeckung bei 778 m³/h. In der Simulation wird eine Regenerationsquote von 93 % erreicht. Der Eintrag findet in jeder Stunde des Jahres statt, wodurch die Temperatur im RL konstant erhöht wird. Durch die erhöhten RL-Temperaturen muss der ATES weniger Energie dem Netz beisteuern, um den Bedarf der Verbraucher zu decken. Es werden innerhalb eines Jahres 2,9 GWh aus dem ATES ausgetragen und 2,78 GWh wieder eingetragen. Die untenstehende stellt die Energiebilanz des ATES dar.

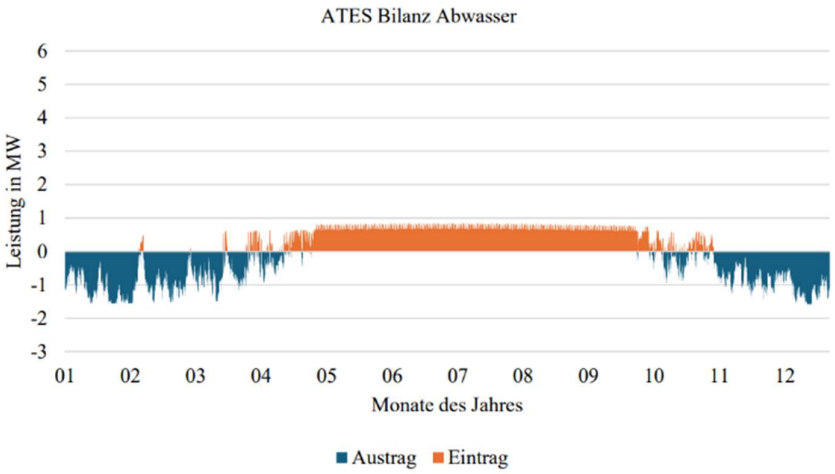


Abb. 5: ATES Bilanz Abwasser Szenario im Jahresverlauf

4.2.2 Luftrückkühler

Die eingetragene Leistung durch die LRK schwankt entsprechend der Außentemperatur und erreicht bei den höchsten Temperaturen einen gesammelten Energieeintrag von 5,5 MW. Durch die Abhängigkeit zur Außentemperatur fällt der Energieeintrag der LRK primär zwischen April und Oktober an. Die Ertragsspitzen sind im Juni und Juli zu erwarten. Der Volumenstrom durch den Brunnen-WT erreicht durch den Eintrag der Regenerationsenergie Spitzenwerte von 1.698 m³/h im Juni. Bei der Deckung des Bedarfs, ohne Wärmeeinspeicherung in den ATES, liegt der maximale Wert des Durchflusses bei 600 m³/h. Die ATES Bilanz für das LRK Szenario ist in der untenstehenden Grafik dargestellt. Es werden im Jahresverlauf 5,39 GWh in den saisonalen Speicher eingetragen, während 5,49 GWh ausgetragen werden. Dies entspricht einer Regenerationsquote von 98 %.

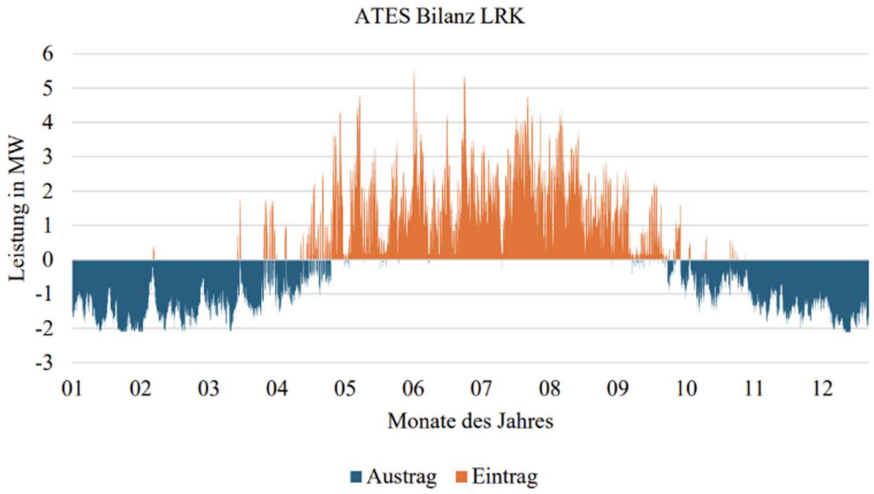


Abb. 6: ATES Bilanz LRK Szenario im Jahresverlauf

4.2.3 Photovoltaik-Thermie

Der maximale Energieeintrag durch die Module liegt gesammelt im Projektgebiet bei 5,9 MW. In Abhängigkeit zur globalen Einstrahlung fällt der Energieeintrag primär zwischen März und November an, die Ertragsspitzen fallen überwiegend in den Zeitraum Juni bis August. Durch die hohen eingespeisten Energiemengen fallen im Vergleich zu den anderen Szenarien die größten Massenströme an. Die Spitzen des Durchflusses liegen in den Monaten Mai bis August, der maximale Wert des Durchflusses liegt bei 1.833 m³/h. Nur zur Deckung des Bedarfs liegt der maximale Durchfluss am Brunnen-WT bei 600 m³/h. Die untenstehende Abbildung stellt die Bilanz im ATES dar. Es wird ein jährlicher Energieeintrag von 4,96 GWh erreicht. Im Verhältnis genutzt zum Energieaustrag von 5,2 GWh beschreibt dies eine Regenerationsquote von 94 %.

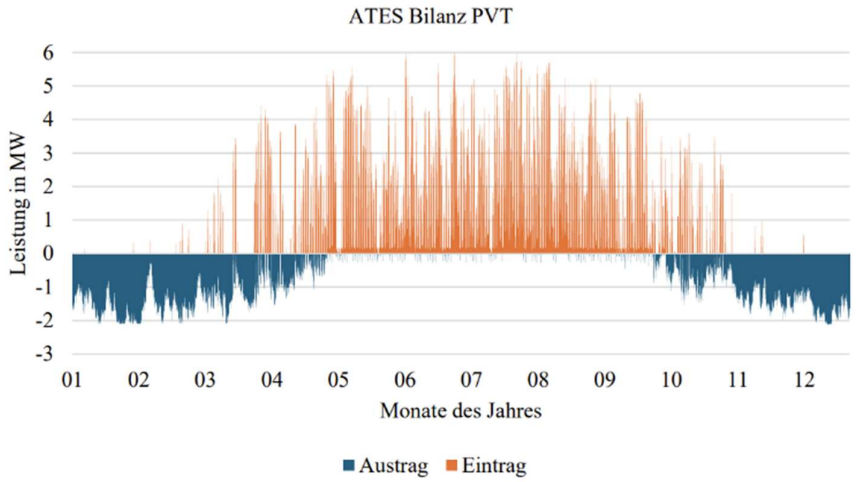


Abb. 7: ATES Bilanz PVT Szenario im Jahresverlauf

4.3 Stromverbrauch

Die JAZ des Gesamtsystems repräsentiert die Effizienz der Wärmeversorgung, indem der eingesetzte Strom auf die gelieferten Wärmemengen (9,82 GWh) bezogen wird. Die JAZ des PVT Szenarios liegt mit 2,46 am höchsten, gefolgt von Abwasser mit 2,4 und am niedrigsten das LRK Szenario mit 2,31. Die untenstehende Grafik schlüsselt die anfallenden Strombedarfe je eingesetzter Komponenten für jedes Szenario auf.

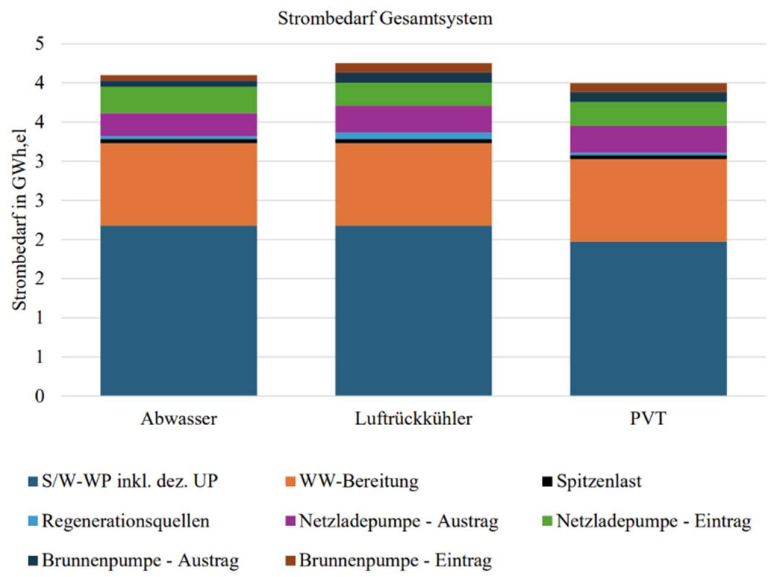


Abb. 8: Verteilung des Strombedarfs eines Jahres je Szenario

Der höchste Strombedarf fällt für die Heizwärmeerzeugung an. Im PVT Szenario fallen die Energiebedarfe geringer aus, da die WP aufgrund der hohen PVT-Sole-Temperaturen effizienter arbeiten. Je Gebäudekomplex wird der Strombedarf mit dem lokal anfallen PV-Stromertrag verrechnet. Die Eigenverbrauchsquote ist im LRK-Szenario mit 51 % am höchsten, das Abwasser Szenario folgt mit 47 %, im PVT Szenario ist die Quote mit 44 % am geringsten.

Tabelle 1: Strombedarf, -erzeugung und -zukauf je Szenario

	Abwasser	**LRK**	**PVT**
Strombedarf	**4.100 MWh**	**4.250 MWh**	**4.000 MWh**
Heizung + Warmwasser	3.280 MWh	3.280 MWh	3.080 MWh
Regenerationsquellen	40 MWh	80 MWh	30 MWh
Brunnenbetrieb	780 MWh	880 MWh	890 MWh
Systemjahresarbeitszahl	**2,4**	**2,31**	**2,46**
Stromerzeugung	**1.180 MWh**	**1.180 MWh**	**1.250 MWh**
Eigenversorgung	560 MWh	600 MWh	550 MWh
EV-Quote	47 %	51 %	44 %
Stromeinspeisung	620 MWh	580 MWh	710 MWh
Stromzukauf	**3.540 MWh**	**3.650 MWh**	**3.450 MWh**

4.4 Wärmegestehungskosten

Sowohl die kapitalgebundenen Kosten als auch die betriebsgebundenen Kosten sind im Abwasser-Szenario am geringsten. Im LRK Szenario entstehen durch den Betrieb der LRK die höchsten betriebsgebundenen Kosten. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten für die PVT-Module fallen die kapitalgebundenen Kosten in diesem Szenario am höchsten aus. Der Kapitalwert nach 20 Jahren liegt im PVT-Szenario 4 % über dem des Abwasserszenarios. Als stromabhängiges Wärmesystem hat der Stromtarif für den externen Zukauf großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Die untenstehende Abbildung zeigt die LCOH bei verschiedenen Stromtarifen.

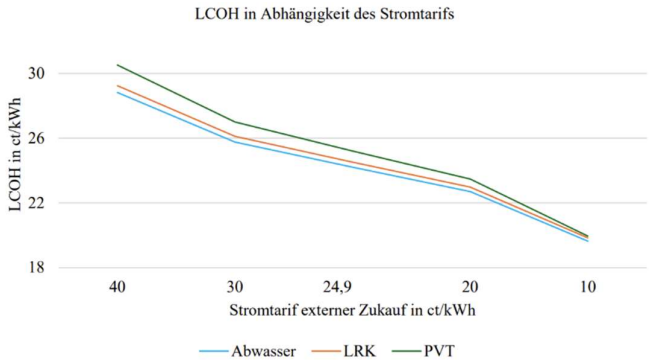


Abb. 9: Veränderung der LCOH in Abhängigkeit vom Stromtarif (externer Zukauf) je Szenario

Die Höhe der LCOH wird für alle drei Szenarien als plausibel eingeschätzt. Als Vergleich wurden die LCOH von real existierenden kalte Nahwärmenetzen in Deutschland betrachtet: Ausgehend von den laufenden Wärmepreisen und den einmaligen Anschlusskosten, liegen die LCOH der sechs recherchierten Netze zwischen 15 ct/kWh und 30 ct/kWh (Haußner, 2023).

5. Fazit

Die Einbindung eines NT-ATES ermöglicht die Nutzung von Umweltenergien, welche außerhalb des Bedarfszeitraums, d. h. der Heizperiode, anfallen. Der Eintrag der vorrangig im Sommer anfallenden Umweltenergien in den Aquifer ermöglicht die zeitliche Inkongruenz zwischen Erzeugung und Bedarf auszugleichen. Die vorgestellten Szenarien stellen eine Möglichkeit dar, auch für Gebäudebestand ein kaltes Nahwärmenetz mit einer geothermischen Quelle nachhaltig zu betreiben. Die im Rahmen dieser Arbeit aufgestellten LCOH bieten eine richtungsweisende Einschätzung zum Vergleich der Wirtschaftlichkeit verschiedener Umweltenergiequellen zur saisonalen Wärmespeicherung. Weitere Vergleichsparameter sind die Jahresarbeitszahl des Gesamtsystems, Genehmigungs- und Erschließungsaufwand und Synergieeffekte. Der Genehmigungsaufwand hängt im Abwasser Szenario von der Zusammenarbeit mit den örtlichen Wasserbetrieben ab, während im LRK-Szenario Schallschutz berücksichtigt werden muss. Erschließungsaufwand ist durch den Eingriff in die Bestandsinfrastruktur der Kanalisation im Abwasser-Szenario nicht zu vernachlässigen. Auch im PVT-Szenario fällt dieser aufgrund der hydraulischen Anbindung der Module hoch aus. Synergieeffekte sind vor allem im PVT-Szenario anzusiedeln: Die direkte Nutzung der thermischen Energie und der zusätzliche, vergleichsweise höhere Stromertrag steigern die Systemeffizienz. Die in dieser Arbeit vorgestellte technoökonomische Analyse bietet eine Orientierungsgrundlage für weitere Planungsschritte zum Aufbau des Wärmenetzes in Berlin-Kreuzberg. Die Betrachtungen und Ergebnisse lassen sich in der Forschung bzgl. 5GDHC Wärmenetze einordnen und können einen Beitrag leisten, um den Ausbau einer emissionsreduzierten Wärmeversorgung voranzutreiben. Weiterreichende Analysen sollten sich auf eine dynamische Betrachtung der Netz-VL-Temperatur fokussieren. Es sollte

untersucht werden, inwiefern die im Rahmen dieser Arbeit angenommene Sinusschwankung den dynamischen Energieeintrag und -austrag abbildet. Forschungsbedarf liegt ebenfalls bei der Wahl der hydraulischen Einbindung der Umweltenergien und bei dem Betrieb bzw. bei der Betrachtung der Leistungsgrenzen der Brunnenanlage.

Quellenangaben

Abuasbeh, M.; Acuña, J.; Lazzarotto, A.; Palm, B: „Long term performance monitoring and KPIs' evaluation of Aquifer Thermal Energy Storage system in Esker formation: Case study in Stockholm", Geothermics, Jg. 96, S. 102166, 2021, doi: 10.1016/j.geothermics.2021.102166.

Boesten, S.;Ivens, W.; Dekker, S. C.; Eijdems, H.: „5th generation district heating and cooling systems as a solution for renewable urban thermal energy supply", Adv. Geosci., Jg. 49, S. 129– 136, 2019, doi: 10.5194/adgeo-49-129-2019.

Buffa, S.; Cozzini, M.; D'Antoni, M.; Baratieri, M.; Fedrizzi, R: „5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Jg. 104, S. 504–522, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.12.059.

Consolar Solare Energiesysteme GmbH, Hg.: „Wärmepumpenkollektor Solink: Solink: Energiequelle für Wärmepumpen", consolar.de. [Online]. Verfügbar unter: https://www.consolar.de/de/pvt-kollektor-solink/. Zugriff am: 18. September 2024.

Danfoss GmbH, Hg., „Fernwärmesysteme planen, visualisieren und optimieren - mit Leanheat® Network", assets.danfoss.com. [Online]. Verfügbar unter: https://assets.danfoss.com/documents/173708/AD367841540645de-010103.pdf.

Deutsche Energie-Agentur, Hg.: „DENA-Gebäudereport 2024: Zahlen, Daten, Fakten zum

Klimaschutz im Gebäudebestand", 2023.

Deutscher Wetterdienst, Hg.: „Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse". Ein Gemeinsames Projekt im Auftrag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD), Offenbach, Juli 2017.

Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung: Teil 12: Tabellenverfahren für Wohngebäude, 18599-12, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Apr. 2021.

Gürtler, H.; Dunkelberg, E.; Gunkel, M.; Kurc, H.; Gnirß, R.: „Abwasserwärme: Ein Leitfaden", Berliner Wasserbetriebe (Hg.), BMBF, FONA, iöw, 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bwb.de/de/assets/downloads/leitfaden-abwasserwaerme.pdf.

Haußner, A.: „Simulationsbasierte Analyse der Wirtschaftlichkeit kalter Wärmenetze und Entwicklung von Geschäftsmodellen". Masterarbeit, Fakultät Verfahrenstechnik, Technische Hochschule Nürnberg, 2023.

Houben, G. J.; Collins, S.; Bakker, M.; Daffner, T.; Triller, F.; Kacimov, A.: „Review: Horizontal, directionally drilled and radial collector wells", Hydrogeol J, Jg. 30, Nr. 2, S. 329–357, 2022, doi: 10.1007/s10040-021-02425-w.

Konstantin, P. und M. Konstantin, M.: Praxisbuch Energiewirtschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2023.

Solare Trinkwassererwärmung: Allgemeine Grundlagen, Systemtechnik und Anwendung im Wohnungsbau, 6002 - Blatt 1, VDI Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Sep. 2004.

Todorov, O.; Alanne, K.; Virtanen, M.; Kosonen, R.: „A method and analysis of aquifer thermal energy storage (ATES) system for district heating and cooling: A case study in Finland", Sustainable Cities and Society, Jg. 53, S. 101977, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2019.101977.

Ella-Barowsky-Str. 69, 10829 Berlin
luise.westphal@gmx.de, info@ezeit-ingenieure.eu