

Verbesserung der Thermalwasserauskühlung mit Hilfe von Absorptions-Hausanschlussstationen

Leonard Hetrodt, Jan Albers¹

Fraunhofer Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG
Gulbener Straße 23, 03046 Cottbus

Keywords: Injektionstemperatur, Rücklauftemperatur, Absorption, Wirtschaftlichkeit, Geothermie

Kurzfassung

Eine ausreichend niedrige Netzzücklauftemperatur ist für die Wirtschaftlichkeit von tiefen und mitteltiefen Geothermie Projekten von hoher Bedeutung. Mit Hilfe neu entwickelter Absorptions-Hausanschlussstationen (engl. *Absorption House Connection Stations*, AHCS) ist es möglich, die Rücklauftemperatur im Wärmeverteilnetz unter die Rücklauftemperatur des Gebäudeheizungssystems zu senken. Dadurch ist auch eine Erhöhung der Thermalwasserauskühlung bzw. eine Verringerung der Injektionstemperatur möglich. Außerdem wird für die gleiche Gebäudeheizleistung ein geringerer Volumenstrom im Wärmeverteilnetz benötigt, so dass entweder zusätzliche Verbraucher angeschlossen werden können oder der Leistungsbedarf der Netzförderpumpen reduziert werden kann. Im Beitrag wird die technische Funktionsweise der AHCS dargestellt und die wirtschaftlichen Auswirkungen einer verringerten Rücklauftemperatur betrachtet. Insbesondere für geothermisch versorgte Fernwärmenetze zeigt sich, dass sich die Mehrinvestitionen für eine AHCS gegenüber einer konventionellen Anschlussstation innerhalb der technischen Nutzungsdauer amortisieren. Weitere Vorteile, die sich aus dem Sommerbetrieb der AHCS als Kälteanlage ergeben, sind dabei noch nicht eingerechnet.

1. Einleitung

Eine Transformation des Wärmesektors ist im Zuge der globalen Klimakrise und zur Erfüllung nationaler sowie europäischer Klimaziele unverzichtbar. Mehr als die Hälfte des Endenergieverbrauchs in Deutschland entfällt auf die Bereitstellung von Wärme und Kälte, was den Ausbau und die Modernisierung von Fernwärmenetzen zu einer Schlüsselaufgabe macht [1, 2]. Um die Klimaziele zu erreichen, soll der Anteil der Fernwärme an der Raumwärme in Deutschland bis 2030 auf 30 % erhöht werden. Dies erfordert eine signifikante Steigerung der Anschlussgrade in den Netzen, d.h. die Anzahl der angebundenen Gebäude muss deutlich steigen [3], und die Wärmebereitstellung muss dekarbonisiert werden. Ein zentraler Ansatz ist dabei die Senkung der Netztemperaturen um eine verstärkte Einbindung erneuerbarer Energiequellen wie Solarthermie, Geothermie und Großwärmepumpen zu ermöglichen [4, 5].

Obwohl der Absenkung der Vorlauftemperaturen oft Grenzen gesetzt sind (z.B. wegen der Trinkwarmwasserbereitung), ist die Rücklauftemperatur ebenfalls entscheidend, da eine geringe Rücklauftemperatur die Effizienz der Wärmeverteilung und -erzeugung erhöht und dadurch fossile Energieträger im Wärmesektor reduziert werden können [6, 7]. Eine neuartige Absorptions-Hausanschlussstation (AHCS) bietet eine auch wirtschaftlich attraktive Möglichkeit, die Rücklauftemperaturen in Fernwärmenetzen zu senken [8]. Gleichzeitig ergibt sich durch die höhere Auskühlung eine größere Netzkapazität, die z.B. für den Anschluss ehemals Erdgas versorgter Verbraucher bzw. Gebiete genutzt werden kann und damit den Fernwärmeabsatz steigert.

¹ Korrespondenzautor: jan.albers@ieg.fraunhofer.de

2. Absorptions-Hausanschlussstation

2.1 Funktionsweise

Im Weiteren wird die Funktionsweise der Absorptions-Hausanschlussstation erläutert. Dazu ist in Abb. 1 die hydraulische Einbindung der AHCS zwischen Fern- und Gebäudeheizungsnetz gezeigt. Im Zentrum der AHCS steht eine Absorptionswärmepumpe (engl. *Absorption heat pump*, AHP) mit vier Wärmeübertragern Desorber (D), Verdampfer (E) sowie Kondensator (C) und Absorber (A), die in drei Fluid-Kreisläufe eingebunden sind. Die Temperaturverläufe in den drei Kreisläufe sowie die übertragenen Leistungen sind in Abb. 2 beispielhaft für einen Lastfall mit 220 kW Heizleistung gezeigt.

1. Fernwärmekreislauf (rot): Der Fernwärmeevolumenstrom \dot{V}_{DH} tritt mit Vorlauftemperatur $t_{DH,fl}$ in die Hausanschlussstation ein und wird über das Regelventil C_D auf die Eintrittstemperatur in den Desorber, t_{Di} eingestellt. An den Desorber der AHP wird die Antriebsleistung \dot{Q}_D übertragen, so dass sich der Fernwärmeevolumenstrom auf t_{Do} abkühlt. Anschließend fließt das Fluid durch den Hochtemperatur-Wärmeübertrager (HT) und gibt dort die Leistung \dot{Q}_{HT} an den Heizungskreislauf ab. Im Niedertemperatur-Wärmeübertrager (LT) wird schließlich die letzte Teilleistung \dot{Q}_{LT} an den Kaltwasserkreislauf übertragen und das Fernwärme-Fluid verlässt die Hausanschlussstation mit der Fernwärmerücklauftemperatur $t_{DH,rl}$.
2. Kaltwasserkreislauf (blau): Das Kaltwasser wird durch die im LT übertragene Fernwärmeleistung \dot{Q}_{LT} erwärmt. Anschließend wird dieser Wärmestrom als Verdampferleistung an die AHP abgegeben (d.h. $\dot{Q}_E = \dot{Q}_{LT}$). Die gesamte Leistung über die AHP ist die Summe aus Desorber- und Verdampferleistung $\dot{Q}_{AHP} = \dot{Q}_D + \dot{Q}_E$.
3. Heizungskreislauf (grün): Die Leistung der AHP \dot{Q}_{AHP} wird genutzt, um das Heizungswasser von der Rücklauftemperatur $t_{HH,rl}$, mit der es in den Absorber eintritt (d.h. $t_{Ai} = t_{HH,rl}$), bis auf die Kondensator-Austrittstemperatur t_{Co} zu erwärmen. Es gilt daher auch $\dot{Q}_{AHP} = \dot{Q}_A + \dot{Q}_C$. Anschließend wird es im nachgeschalteten HT Wärmeübertrager weiter auf die Vorlauftemperatur $t_{HH,fl}$ erwärmt, bevor es in das Heizungssystem des Gebäudes zurückfließt.

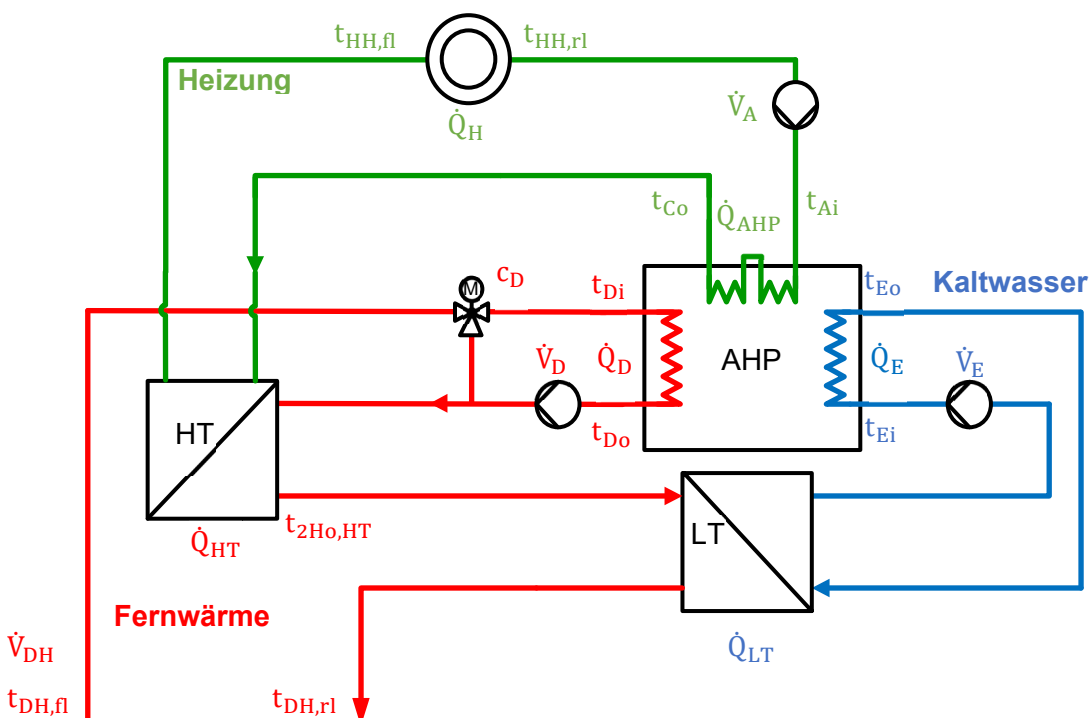


Abb. 1: Hydraulischer Systemplan einer Absorptions-Hausanschlussstation

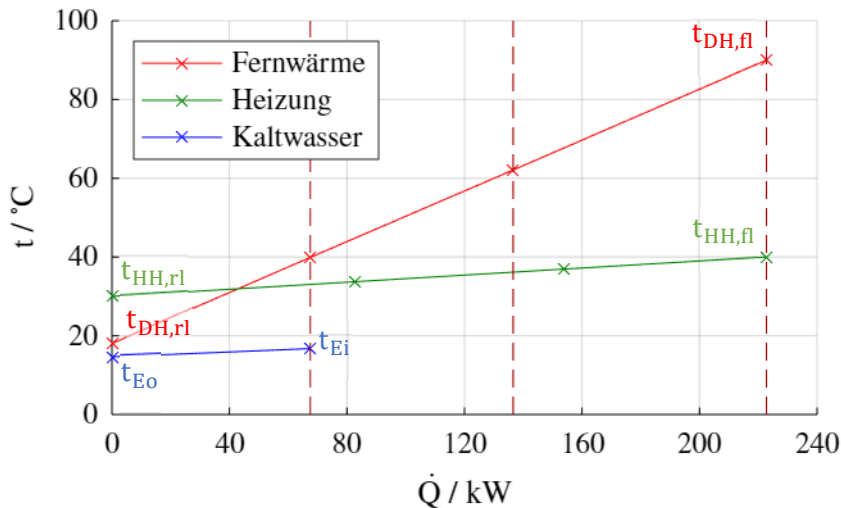


Abb. 2: Temperaturverlauf von Heißwasser, Heizungswasser und Kaltwasser für eine Heizleistung von 220 kW.

Bei einer ausreichend hohen Temperaturdifferenz $\Delta t_{fl} = t_{DH,fl} - t_{HH,fl}$, zwischen verfügbarer Fernwärmeverlauftemperatur und geforderter Heizungsvorlauftemperatur kann die Antriebsleistung \dot{Q}_D dazu genutzt werden, um die auf tiefem Temperaturniveau abgeführte Fernwärme \dot{Q}_{LT} auf ein höheres, nutzbares Temperaturniveau im Heizungsnetz hochzupumpen. Durch den Absorptionswärmepumpenprozess zwischen Fernwärme- und Heizungskreislauf kann dadurch die Fernwärmehöchsttemperatur unterhalb der Heizungsvorlauftemperatur liegen ($\Delta t_{rl} = t_{DH,rl} - t_{HH,rl} < 0$). Damit kann bei gleicher übertragener Leistung der Fernwärmehöchsttemperatur verringert werden.

2.2 Proof of Concept

Im Rahmen von zwei Forschungsprojekten [9], [10] wurde der Prototyp einer AHCS betrieben und vermessen. In einem Bürogebäude Baujahr 1980 wurde das System ab 2010 zunächst zur Kühlung des Gebäudes verwendet, während zum Heizen parallel eine konventionelle Hausanschlussstation (engl. *Conventional House Connection Station*, CHCS) verwendet wurde. Ab 2017 wurde das System aufgerüstet, wodurch die Anlage im Heizbetrieb auch als AHCS genutzt werden konnte [11]. In den o.g. Forschungsprojekten wurde für verschiedene Außentemperaturen zwischen ca. -15 °C bis 10 °C mit Hilfe von Messwerten gezeigt, dass bei Fernwärmehöchsttemperaturen, $t_{DH,fl}$ zwischen 125 °C und 80 °C die Rücklauftemperaturen, $t_{DH,rl}$ um $5 - 10$ K niedriger lagen als im Vergleich zu einer CHCS. Durch die größere Auskühlung $\Delta t_{DH,rl} = t_{DH,rl}^{CHCS} - t_{DH,rl}^{AHCS}$ konnte für die gleiche Heizleistung ein um $10 - 40$ % geringerer notwendiger FW-Volumenstrom nachgewiesen werden (siehe [8]).

2.3 Simulation des Teillastverhaltens

Um die wirtschaftlichen Auswirkungen einer AHCS gegenüber einer CHCS beurteilen zu können wurde in [12] ein Simulationsmodell zur Berechnung aller Teillastzustände im Jahresverlauf in OCTAVE GNU aufgebaut. Die Teillastzustände sind abhängig von vorgegebenen Außentemperaturdaten mit Standort Dortmund. Die Fernwärmehöchsttemperatur, die Heizleistung sowie die zugehörige Heizungsvorlauftemperatur werden entsprechend der Außentemperatur eingestellt. Zusätzlich wird zwischen Hochtemperatur- und Niedertemperatur-Heizsystemen (HTH und NTH) unterschieden. Erstere haben Temperaturen von maximal $t_{HH,fl} = 65$ °C im Vorlauf und konstant $t_{HH,rl} = 50$ °C im Rücklauf. Dagegen hat das Niedertemperatur-Heizsystem maximal $t_{HH,fl} = 40$ °C

im Vor- und konstant $t_{HH,rl} = 30 \text{ °C}$ im Rücklauf. Die maximale Heizleistung einer AHCS auf Basis der AHP vom Typ Hummel (siehe [13]) beträgt ca. $\dot{Q}_{H,max} = 220 \text{ kW}$. Abhängig von der anliegenden Heizlast \dot{Q}_H wird die Eintrittstemperatur in den Desorber t_{Di} über das Ventil C_D geregelt. Die simulierten Ergebnisse der sich ergebenden Rücklauftemperaturen, $t_{DH,rl}$ sowie der notwendigen Fernwärmeevolumenströme \dot{V}_{DH} sind in Abb. 3 für das Hoch- und Niedertemperatur-Heizsystem bis zu einer minimalen Leistung von ca. 20 kW gezeigt.

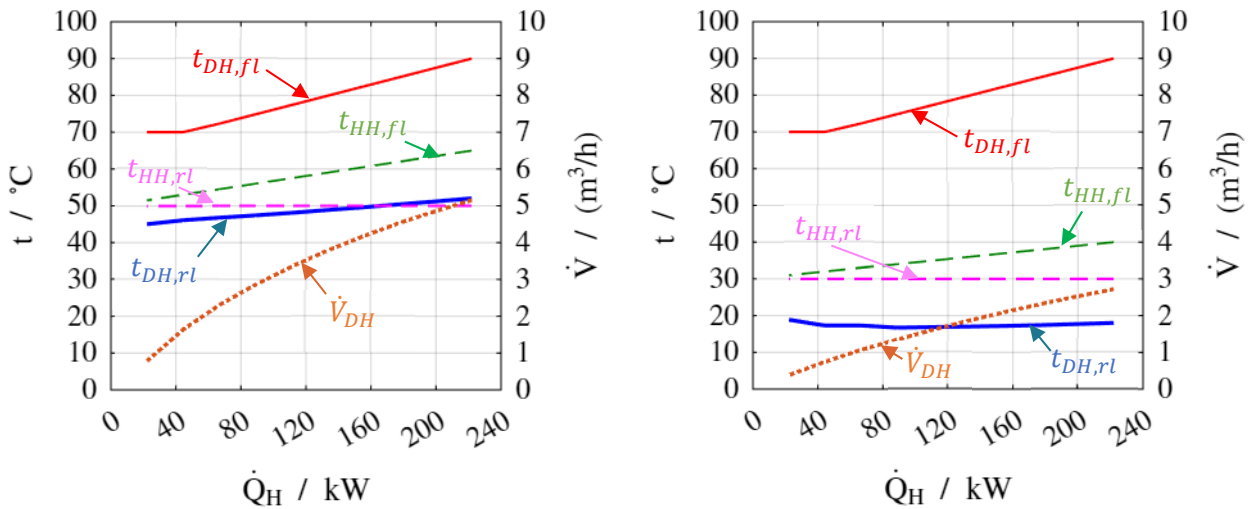


Abb. 3: Simulationsergebnisse verschiedener Teillastzustände der AHCS mit Hochtemperatur-Heizsystem (links) und Niedertemperatur-Heizsystem (rechts)

Bei steigender Außentemperatur sinkt die benötigte Heizleistung, sowie die Fernwärme- und Heizungsvorlauftemperatur. Die Fernwärmeevorlauftemperatur wird einem gleitend-konstanten Verlauf gemäß von $t_{DH,fl,max} = 90 \text{ °C}$ bis auf $t_{DH,fl,min} = 70 \text{ °C}$ gesenkt. Für die HTH resultiert die Fernwärmerücklauf-temperatur zu $t_{DH,rl,max}^{HTH} = 52 \text{ °C}$ bei maximaler und $t_{DH,rl,min}^{HTH} = 45 \text{ °C}$ bei minimaler Leistung. Der Fernwärmeevolumenstrom liegt im Maximum bei $\dot{V}_{DH,max}^{HTH} = 5,2 \text{ m}^3/\text{h}$ und im Minimum bei $\dot{V}_{DH,min}^{HTH} = 0,8 \text{ m}^3/\text{h}$. Im Gegensatz dazu liegt die resultierende Fernwärmerücklauf-temperatur mit NTH durchgehend unterhalb von $t_{DH,rl} = 20 \text{ °C}$. Außerdem kann der Fernwärmeevolumenstrom beinahe halbiert werden zu $\dot{V}_{DH,max}^{NTH} = 2,7 \text{ m}^3/\text{h}$ bei maximal und $\dot{V}_{DH,min}^{NTH} = 0,4 \text{ m}^3/\text{h}$ bei minimal berechneter Heizleistung.

In der Simulationsumgebung werden die gleichen Lastvariationen auch für die CHCS berechnet. Die Ergebnisse für die resultierenden Fernwärmerücklauf-temperaturen und -volumenströme von AHCS und CHCS sowie deren Differenzen sind in Abb. 4 für den Fall mit NTH gezeigt. Die Fernwärmerücklauf-temperatur der CHCS liegt konstant oberhalb von 30 °C . Bei niedrigster Leistung ergibt sich somit eine um $\Delta t_{DH,rl,min} = 11 \text{ K}$ niedrigere Rücklauf-temperatur mit der AHCS gegenüber dem gleichen Lastfall mit CHCS. Bei maximaler Heizleistung steigt der Unterschied auf $\Delta t_{DH,rl,max} = 16 \text{ K}$ an. Als Folge der höheren Auskühlung mit AHCS ergibt sich eine entsprechende Einsparung im Fernwärmeevolumenstrom. Bei minimaler Leistung beträgt der Unterschied $\Delta \dot{V}_{DH} = \dot{V}_{DH}^{CHCS} - \dot{V}_{DH}^{AHCS} = 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$. Dieser Unterschied steigt bei maximaler Leistung bis auf $\Delta \dot{V}_{DH} = 0,8 \text{ m}^3/\text{h}$ an. In Zeiträumen mit der größten Netzbelastung (d.h. bei geringsten Außentemperaturen) sind die technischen Vorteile der AHCS gegenüber der CHCS auch am größten. Ergänzend dazu hat die Simulation aller Lastzustände in einer außentemperaturabhängigen Häufigkeitsverteilung gezeigt, dass die Kosteneinsparungen aus den häufig auftretenden Teillastzuständen den größten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben (siehe [12]).

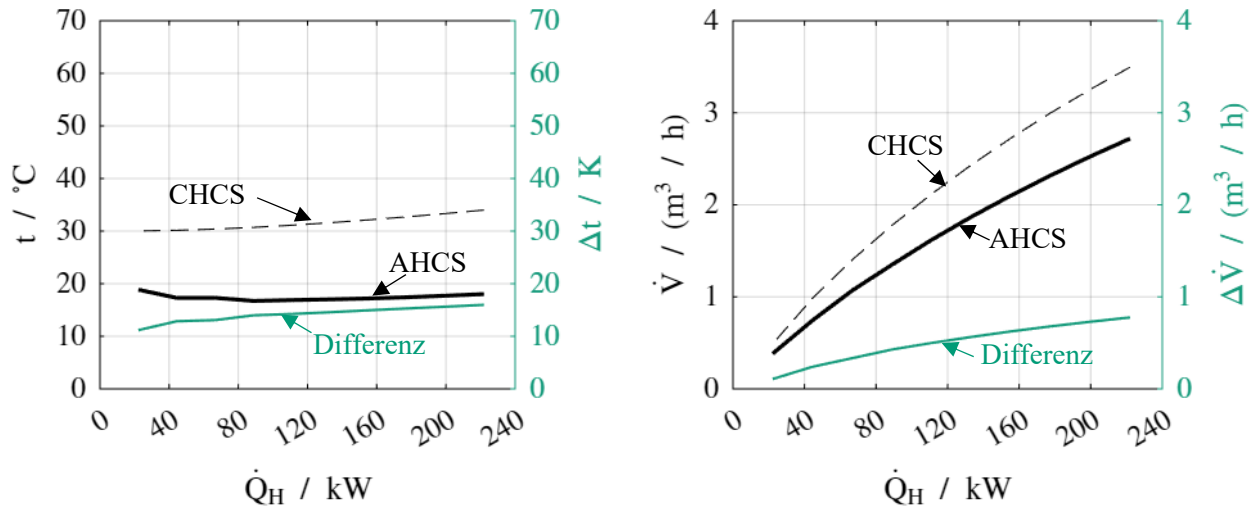


Abb. 4: Simulationsergebnisse verschiedener Teillastzustände mit Niedertemperatur-Heizsystem inklusive Differenz von AHCS und CHCS der Fernwärmerücklauftemperaturen (links) und Fernwärmeevolumenströme (rechts)

3. Wirtschaftlichkeit

Die zuvor beschriebenen technischen Potentiale der Nutzung einer AHCS gegenüber einer CHCS haben auch wirtschaftliche Vorteile. Zum einen führt die verringerte Fernwärmerücklauftemperatur zu Kosteneinsparungen bei der Erzeugung der Wärmeleistung. Bei einer Geothermie-Anlage kann das Thermalwasser weiter ausgekühlt werden und damit eine höhere Wärmeleistung bei gleichem Thermalwasservolumenstrom (und damit auch gleichem Elektroenergieaufwand in der Thermalwasserpumpe) erzeugt werden. Bei einer (Groß-)Wärmepumpe als Wärmeerzeuger in einem dekarbonisierten Fernwärmenetz führt die Absenkung der Fernwärmerücklauftemperatur dagegen zu einem geringeren Temperaturhub, wodurch sich bei gleicher Heizleistung eine bessere Energieeffizienz (COP) und damit ein geringerer Strombedarf ergibt. Der zweite positive Effekt ist bei einem bereits stark ausgelasteten Fernwärmenetz die mögliche Nutzung des freiwerdenden Volumenstroms z.B. für Neukunden aus ehemals Erdgas versorgten Gebieten. Die resultierenden Betriebskosteneinsparungen werden aus der Differenz zwischen den Einnahmen aus dem erhöhtem Wärmeverkauf durch zusätzliche Wärmeverbraucher ΔK_{cons} und den Kosten für die zusätzlich zu erzeugende Wärmemenge ΔK_{prod} berechnet. Denn trotz verbesserter Effizienz bei der Wärmebereitstellung aus der Geothermie- Anlage oder (Groß-)Wärmepumpe ist $\Delta K_{prod} > 0$, da eine größere Wärmemenge erzeugt werden muss.

$$\Delta K_{opex} = \Delta K_{cons} - \Delta K_{prod} \quad (1)$$

Dem gegenüber stehen die zusätzlichen Investitionen für die AHCS anstatt einer CHCS. Die nötige Investition der AHCS beträgt ca. $I_{AHCS} = 141.200$ €. Dagegen liegt die nötige Investition für eine CHCS bei ca. $I_{CHCS} = 16.100$ € [14]. Die kapitalgebundenen Kosten für die AHCS gegenüber der CHCS resultieren aus der Mehrinvestition ΔI multipliziert mit der Annuitätenkoeffizienten a .

$$\Delta K_{capex} = \Delta I \cdot a = (I_{AHCS} - I_{CHCS}) \cdot a \quad (2)$$

Bei einem Basiszinssatz von $z = 3,62$ % und einer angesetzten Lebensdauer von 25 a ergibt sich ein Annuitätenfaktor von $a = 0,061 \text{ a}^{-1}$ [15]. Die zusätzlichen, kapitalgebundenen Kosten belaufen sich damit nach Gleichung (2) auf $\Delta K_{capex} = 7.698$ €/a. Aus der Differenz zwischen den eingesparten Betriebskosten und den zusätzlichen kapitalgebundenen Kosten wird der resultierende Kosteneinsparung ΔK_{res} berechnet.

$$\Delta K_{res} = \Delta K_{opex} - \Delta K_{capex} \quad (3)$$

Dabei wurde ein Fernwärmepreis von $p_{DH} = 0,12 \text{ €/kWh}$ und ein Strompreis von $p_{el} = 0,16 \text{ €/kWh}$ angenommen. Die Ergebnisse sind in Abb. 5 gezeigt. Auf der Ordinate ist die resultierende Kosteneinsparung für die Hoch- und Niedertemperatur-Heizsysteme abgebildet. Das System mit HTH erzielt für alle drei untersuchten Erzeugertechnologien Solarthermie, Wärmepumpe und Geothermie negative Ergebnisse. Dagegen sind die Ergebnisse für die NTH durchweg im positiven Bereich. Für die Kombination von AHCS mit Geothermie oder Wärmepumpe als Fernwärme-Erzeugertechnologie ergeben sich Amortisationszeiten $\tau_A = \Delta I / \Delta K_{res}$, die nahe bzw. unterhalb der technischen Nutzungsdauer liegen, so dass ein wirtschaftlicher Betrieb von AHCS möglich ist. Bei Ansatz einer Förderung fällt dieses Ergebnis noch deutlicher aus (siehe Abb. 5). Außerdem ist zu berücksichtigen, dass in die bisherigen Betrachtungen die Nutzung der AHCS im Sommer als Absorptionskälteanlage mit weiterer Erhöhung des Fernwärmeabsatzes nicht eingeflossen ist.

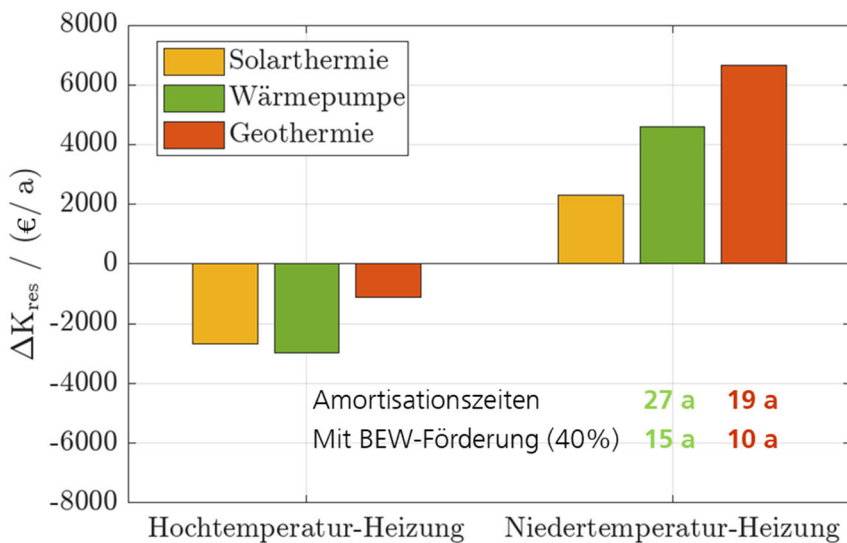


Abb. 5: Resultierende Gesamtkosteneinsparung

4. Zusammenfassung

Mit dem Einsatz von Absorptions-Hausanschlussstationen (AHCS) anstelle von konventionellen Anschlussstationen (CHCS) kann mehreren Herausforderungen bei der Transformation von Wärmenetzen begegnet werden. Die Netzkapazität kann durch die größere Auskühlung mit Sorptionskreislauf um ca. 10 – 30 % gesteigert werden, da für den gleichen Heizwärmebedarf eines Gebäudes ein geringerer FW-Volumenstrom notwendig ist. Auch in bereits stark ausgelasteten Netzen kann so der Anschlussgrad (z.B. durch Übernahme von bisher mit Erdgas versorgten Kunden) weiter gesteigert werden. Außerdem führt die Reduktion der Rücklauftemperatur um 5 – 15 K zur Reduktion der Netzverluste und zur Effizienzsteigerung bei den regenerativen Wärmeerzeugern des Netzes. Durch die daraus resultierenden Betriebskosteneinsparungen sowie die zusätzlichen Einnahmen aus dem Wärmeverkauf an Neukunden, können die Mehrkosten einer AHCS insbesondere bei Netzen mit Groß-Wärmepumpen und Geothermie-Anlagen innerhalb der technischen Nutzungsdauer erwirtschaftet werden. Zur Durchführung von genaueren technoökonomischen Untersuchungen bei ganzjährige Nutzung der Sorptionsanlage (im Winter als AHCS und im Sommer als Absorptionskälteanlage) sollen mehrere Pilot-Installationen inklusive Monitoring-System aufgebaut werden.

LITERATURANGABEN

- [1] Bundesamt für Justiz: Klimaschutzgesetz. KSG. 2019
- [2] Energieverbrauch für fossile und erneuerbare Wärme, Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) am Umweltbundesamt, 2024
- [3] Nils Thamling, Nora Langreder, Dominik Rau, Marco Wunsch: Perspektive der Fernwärme. Maßnahmenprogramm 2030 Aus- und Umbau städtischer Fernwärme als Beitrag einer sozial-ökologischen Wärmepolitik (2020)
- [4] Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F. u. Mathiesen, B. V.: 4th Generation District Heating (4GDH). *Energy* 68 (2014), S. 1–11
- [5] Köfinger, M., Basciotti, D. u. Schmidt, R.-R.: Reduction of return temperatures in urban district heating systems by the implementation of energy-cascades. *Energy Procedia* 116 (2017), S. 438–451
- [6] Schallenberg, K.: Einfluß der Netztemperaturen in den Abnehmersystemen auf den Wärmegestehungspreis. Angebotspotential der Erdwärme sowie rechtliche und wirtschaftliche Aspekte der Nutzung hydrothermalen Ressourcen. *Geothermie Report 98-1 STR98/09*, (1998)
- [7] Geyer, R., Krail, J., Leitner, B., Schmidt, R.-R. u. Leoni, P.: Energy-economic assessment of reduced district heating system temperatures. *Smart Energy* 2 (2021)
- [8] Petersen, S. u. Albers, J.: Enhanced absorption house connection station for low district heating return line temperatures. *Energy Reports* 7 (2021), S. 27–36
- [9] Petersen, S. et al.: EnEff:Wärme Feldtest Absorptionskältetechnik für KWKK-Systeme. Projektakronym: FAKS, FKZ 03ET1171A, 2019
- [10] Albers, J., Petersen, S., Hüls, W., Hausherr, C. u. Ziegler, F.: EnEff:Wärme - Regelung für energieaufwandsoptimierte Kälteerzeugungssysteme zur Primärenergieeinsparung. Projektakronym: ReKs, FKZ 03ET1583, 2023
- [11] S. Hunt, S. Petersen, C. Hennrich, F. Ziegler: Experimental proof of concept for a water/LiBr single-stage absorption heat conversion system as a house connection station (2018)
- [12] Hetrodt, L.: Energetisches und wirtschaftliches Potential von Absorptions-Hausanschlussstationen im Transformationsprozess von Fernwärmenetzen, Ruhr-Universität Bochum Masterarbeit am Fraunhofer IEG 2024
- [13] Baelz: Absorptionskälteanlage Hummel. Datenblatt, Heilbronn, Deutschland 2024. <https://www.baelz.de/systeme/absorptionskaelte/hummelr>, abgerufen am: 27.05.2024
- [14] Konstantin, P. u. Konstantin, M.: Praxisbuch der Fernwärme- und Fernkälteversorgung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2022
- [15] Deutsche Bundesbank: Bekanntgabe des Basiszinssatzes zum 01.01.2024 auf 3,62 %.