

Reduzierte Temperaturen in Wärmenetzen: Bewertung der energie-ökonomischen Effekte

R. Geyer

AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Vienna, Austria

J. Krail

Fachhochschule Burgenland GmbH, Pinkafeld, Austria

ABSTRACT: District heating (DH) is predestined for a decarbonized heat supply and can thus contribute to achieve climate and energy goals. Particularly in urban areas, DH offers potential for saving resources. Despite the constant expansion, the economic efficiency of DH in some cases has been significantly reduced in recent years.

For efficiency, economy and integration of alternative heat sources in DH, low system temperatures are a key. Reduced supply and return temperatures are expected to increase both capacity and efficiency and subsequently have positive economic effects. However, existing DH networks (DHN) are dominated by high temperature systems and the advantages of low temperature systems are not or insufficiently known. This contribution provides an approach to fill this gap.

The innovative approach of the thesis is to develop key figures for different technologies using energy-economic assessments to show effects and advantages of reduced system temperatures in an evidence-based way. The proven advantages should increase the motivation and conviction in low-temperature systems, both for suppliers and customers.

A total of 14 technologies are investigated. The selection of the technologies is structured in such a way that a broad spectrum is available for further analyses and utilizations. For each technology a reference case and an assessment case with reduced system temperatures are calculated. The resulting changes in capacity and/or efficiency are analyzed and the levelized cost of energy (LCOE) determined for both variants. The difference between higher LCOE in the reference case and lower LCOE in the assessment case is called opportunity costs.

In the energy-economic assessments carried out, the opportunity costs from the reference case and assessment case are placed in relation to the temperature reduction. This results in the opportunity energy generation costs, which in this thesis are referred to as $LCOE_{\text{Opportunity}}$ in €/MWh·°C. The quantitative assessment of the benefits of lost alternatives is shown for each technology investigated. This approach helps to evaluate both single plants as well as entire systems and to show achievable potentials and monetary savings. The technology based key figures are the main results of this contribution.

1. EINLEITUNG

Um klimapolitische Ziele erreichen und eine sichere Energieversorgung auch in Zukunft gewährleisten zu können, werden intelligente Technologien und neue Lösungen für energieeffiziente und klimaverträgliche Lebens- und Arbeitsweisen benötigt. Potenziale zur Schonung von Ressourcen, insbesondere im urbanen Raum, bieten Fernwärmesysteme (Mathiesen et al. 2018). Fernwärme zählt als saubere, komfortable und umweltfreundliche Form der Energiebereitstellung für Heizung und Warmwasser. Ein weiterer Ausbau ist daher aus klima- und energiepolitischer Sicht sinnvoll, insbesondere in Hinblick auf Primärenergie-Einsparung. (Schmidt et al. 2015, Gössl et al. 2014).

1.1 AUSGANGSLAGE UND ROLLE VON FERNWÄRME

Laut Schätzungen existierten 2013 weltweit ca. 80.000 Fernwärmesysteme, davon ca. 6.000 in Europa (Werner 2017). Auch in Österreich sind Fern- bzw. Nahwärmenetze ein wichtiger Bestandteil des Energiesystems. Schätzungsweise bestehen derzeit etwa 2.400 Wärmenetze in Österreich (Schmidt et al. 2018).

Die Fernwärmeerzeugung belief sich 2018 auf 23,1 TWh und der Endenergieverbrauch auf 19,7 TWh. Die Transportverluste berechnen sich zu 3,4 TWh bzw. zu knapp 15 %. Thermische Energie wird in den statistisch erfassten Nutzenergiekategorien „Raumheizung, Klimaanlage, Warmwasser“ mit 82,4 TWh, „Dampferzeugung“ mit 27,7 TWh und „Industrieöfen“ mit 46,8 TWh nachgefragt. Fernwärme deckt mit 16,5 TWh 20 % des Bedarfs der Kategorie „Raumheizung, Klimaanlage, Warmwasser“. Bei der „Dampferzeugung“ liegt der Anteil mit 0,8 TWh bei 3 % und bei Industrieöfen mit 2,4 TWh bei 5 %. Der Erneuerbaren Anteil an der Fernwärme liegt bei 48,4 % gemäß EU-Richtlinie. An der Erzeugung hatten KWK-Anlagen mit 13,7 TWh einen Anteil von 60 %. Davon stammen 6,1 TWh bzw. 44 % aus erneuerbaren Energieträgern. (STATISTIK AUSTRIA 2020)

In Österreich wird mehr als ein Viertel aller Wohnungen durch Fernwärme versorgt, mit steigender Tendenz (FGW 2020). Dennoch stehen viele Betreiber vor ungewissen Zukunftsperspektiven und wirtschaftlichen Schwierigkeiten. Ursache sind unsichere Entwicklungen der Energiepreise, sinkende Wärmenachfragedichten aufgrund von Sanierungsmaßnahmen bzw. hoher Neubaustandards und ansteigende Konkurrenz durch dezentrale individuelle Wärmeversorgungslösungen, v.a. Luftwärmepumpen (vgl. Biermayr et al. 2020).

1.2 NIEDRIGE TEMPERATUREN: WEG ZUR DEKARBONISIERUNG

Zur Dekarbonisierung gilt es verstärkt alternative Wärmequellen in Wärmenetze einzubinden. Hierfür kommen insbesondere erneuerbare Energien wie Solarthermie, Geothermie sowie Umgebungs- und Abwärme aus Gewerbe- und Industriebetrieben in Frage (siehe auch #mission2030 (BMNT & BMVIT 2018)).

Dabei gelten niedrige Vor- und Rücklauftemperaturen als wichtigste „enabler“ für die Integration alternativer Wärmequellen, deren Potenziale erst bei geringen Temperaturniveaus entfaltet werden können (Schmidt et al. 2015, Totschnig et al. 2018). Weitere Vorteile reduzierter Temperaturen sind Kapazitäts- und Wirkungsgradsteigerungen sowie geringere Wärmeverteilungsverluste und Pumpstromkosten. Ebenso können bei Neubau und Sanierung kostengünstigere Rohrleitungssysteme gewählt werden.

Da Systemtemperaturen eine zentrale Rolle bei der Effizienz von Erzeugung und Verteilung in Wärmenetzen spielen, werden auch wirtschaftliche Potenziale erwartet. Daher widmet sich diese Arbeit mit der systematischen Erforschung und Bewertung von Effekten reduzierter Vor- und Rücklauftemperaturen in Wärmenetzen.

2. METHODIK

Ziel der Arbeit ist eine systematische, wissenschaftlich fundierte Untersuchung von Effekten reduzierter Systemtemperaturen in Wärmenetzen. Durch das Bewerten und Aufzeigen von Vorteilen soll so die Motivation und Überzeugung in Niedertemperatur Versorgungssysteme gesteigert werden. Daher stehen folgende Fragestellungen im Zentrum dieser Arbeit:

1. Welche energietechnischen Effekte haben reduzierte Systemtemperaturen in Wärmenetzen auf ausgewählte Technologien?
2. Welche ökonomischen Vorteile ergeben sich durch reduzierte Systemtemperaturen?
3. Lassen sich die Ergebnisse in Form einer Kennzahl darstellen und verallgemeinern?

2.1 INNOVATIONSGEHALT

Der innovative Ansatz der Arbeit liegt darin, dass mithilfe von energie-ökonomischen Bewertungen Kennzahlen entwickelt wurden, mit der Effekte von reduzierten Systemtemperaturen in das Zentrum der Untersuchungen gesetzt werden können. Der verfolgte Ansatz hilft dabei, einzelne Anlagen bzw. ganze Systeme bewerten zu können sowie erzielbare Potenziale und monetäre Einsparungseffekte aufzuzeigen. Das verfolgte Konzept ist in Abb. 1 skizziert.

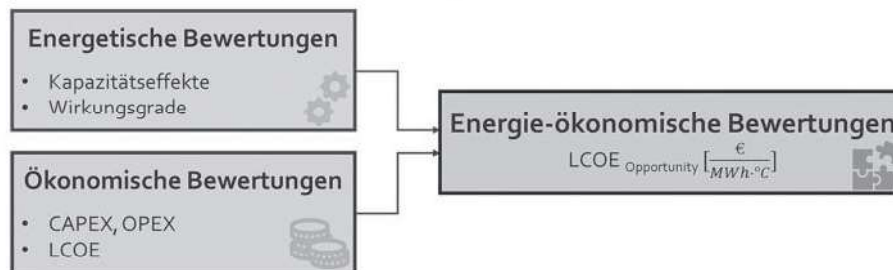


Abb. 1: Verfolgter Ansatz zur Entwicklung der technologiespezifischen Kennzahl $LCOE_{Opportunität}$ zur energie-ökonomischen Bewertung der Effekte reduzierter Systemtemperaturen in Wärmenetzen

2.2 UNTERSUCHUNGSRAHMEN UND METHODENDARSTELLUNG

Für jede Technologie wurden zu Beginn energietechnische Bewertungen durchgeführt. Dabei wurde untersucht, welche Kapazitäts- bzw. Wirkungsgradänderungen sich durch reduzierte Vor- bzw. Rücklauftemperaturen ergeben. Des Weiteren wurden für die einzelnen Technologien Kostendaten recherchiert und wirtschaftliche Bewertungen anhand des Konzepts der Energiegestehungskosten (LCOE) durchgeführt. Dies wurde jeweils für einen Referenzfall (kann als Status quo bezeichnet werden) und für einen Bewertungsfall mit reduzierten Temperaturen durchgeführt. Durch die Kapazitäts- bzw. Wirkungsgradsteigerungen sinken im Bewertungsfall die Energiegestehungskosten. Die Differenz zwischen höheren Energiegestehungskosten im Referenzfall und niedrigeren Energiegestehungskosten im Bewertungsfall wird als Opportunitätskosten bezeichnet.

Opportunitätskosten stellen entgangene Erträge oder Nutzen im Vergleich zu einer nicht realisierten Handlungsalternative dar. Die nicht realisierte Handlungsalternative entspricht dem Bewertungsfall bei reduzierten Temperaturen. Das bedeutet durch den Verzicht auf die Möglichkeit Temperaturen im System zu reduzieren, ergeben sich im Referenzfall Kosten durch entgangene Gewinne infolge geringerer Kapazitäten bzw. Wirkungsgrade.

In den durchgeführten energie-ökonomischen Bewertungen werden die Opportunitätskosten aus Referenzfall und Bewertungsfall in Relation zur Temperaturreduktion gestellt. Daraus ergeben sich die Opportunitäts-Energiegestehungskosten welche in dieser Arbeit als $LCOE_{Opportunität}$ in €/MWh·°C definiert wurde. Die quantitative Bewertung des Nutzens entgangener Alternativen wird für jede untersuchte Technologie ausgewiesen. Dadurch, dass es sich um spezifische Kennzahlen handelt, können diese für verschiedene Betrachtungsebenen (Technologien) und Skalierungen (kleine bis große Systeme) herangezogen werden. Dies gilt als Schlüsselergebnis der Arbeit.

ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der energie-ökonomischen Bewertungen sind anhand von zwei Kennzahlen in Tab. 1 zusammengefasst. Diese Technologie abhängigen Kennzahlen stellen die zentralen Resultate dieser Arbeit dar. Die Kennzahl $LCOE_{Opportunität}$ beschreibt die Opportunitätskosten der Energiegestehungskosten in €/MWh·°C. Mit der Kennzahl wird ausgedrückt, wie sich die Energiegestehungskosten durch Reduktion der Temperaturniveaus verringern lassen. Je höher der Wert, desto höher ist die Abhängigkeit von der Temperatur und der somit erzielbare monetäre Effekt. Die Steigerung der Kapazität beschreibt, den Gradienten zur Kapazitätssteigerung in %/°C bei reduzierten Temperaturen bzw. erhöhten Temperaturspreizungen.

Die Struktur in Tab. 1 ist aufgebaut nach Erzeugungstechnologien gefolgt von Wärmenetz und Speichertechnologien. Die Erzeugungstechnologien sind nach $LCOE_{Opportunität}$ bis auf Solarthermie, absteigend sortiert. Die höchsten Opportunitätskosten $LCOE_{Opportunität}$ mit 0,67 €/MWh·°C weisen der Flachkollektor mit Einfachverglasung und Geothermie (reine Heizzwecke) auf. Die beiden anderen Kollektortypen haben eine geringere Temperaturabhängigkeit wodurch auch $LCOE_{Opportunität}$ geringere Werte aufweist.

Eine hohe Temperaturabhängigkeit weist auch die Technologie Wärmepumpe mit $\text{LCOE}_{\text{Opportunity}}$ von 0,60 €/ (MWh·°C) auf. Die Effekte beziehen sich hier auf höhere erzielbare COPs und damit reduzierte Stromaufnahme ($\cong$ Antriebsenergie). Mit $\text{LCOE}_{\text{Opportunity}}$ von 0,58 €/ (MWh·°C) besitzt Abwärme eine ähnliche Größenordnung wie Wärmepumpen. Bei der KWK-Technologie beziehen sich die Vorteile ebenso auf den Strom. Durch reduzierte Vorlauftemperaturen sind geringere Abdampfdrücke in den Turbinenkondensatoren möglich, wodurch die Stromausbeute gesteigert wird. Zu erkennen ist, dass eine Veränderung der Vorlauftemperatur auf die Entnahme-Kondensationsturbine weniger Einfluss im Vergleich zur Gegendruckturbine hat. Dies ist auf den höheren Freiheitsgrad der Entnahme-Kondensationsturbine zurückzuführen.

Damit Rauchgaskondensation möglich ist, sind vor allem niedrige Rücklauftemperaturen entscheidend. Obwohl sich durch Rauchgaskondensation bei Biomasseanlagen hohe Leistungs- und Wirkungsgradsteigerungen erzielen lassen, fallen bei dieser Technologie die $\text{LCOE}_{\text{Opportunity}}$ mit 0,036 €/ (MWh·°C) im Vergleich am geringsten aus. Dies ist dem geschuldet, dass die Einspareffekte in Relation zu einer hohen Temperaturspreizung von 150 °C gestellt werden. Die berechnete Wirkungsgradsteigerung von 27,7 Prozentpunkten zeigt auf, welches Potenzial zur besseren Ressourcen Ausnutzung diese Technologie hat.

Bei reduzierten Rücklauftemperaturen und gleichbleibenden Vorlauftemperaturen erhöhen sich die Übertragungskapazitäten in Wärmenetzen. Durch die gesteigerte Übertragungskapazität berechnet sich $\text{LCOE}_{\text{Opportunity}}$ zu 0,62 €/ (MWh·°C). Alternativ dazu könnte die Kapazität beibehalten und stattdessen der Massenstrom gesenkt werden. In diesem Fall ergeben sich $\text{LCOE}_{\text{Opportunity}}$ von 0,15 €/ (MWh·°C). Hier liegen die Vorteile, in Bezug auf die Opportunitätskosten $\text{LCOE}_{\text{Opportunity}}$, klar bei der Steigerung der Kapazität im Vergleich zur Alternative mit gesenktem Massenstrom. Bedingung hierbei ist, dass entsprechender Wärmebedarf gegeben ist.

Die Bewertung der Wärmespeicher bezieht sich auf saisonale Speicherung mit einer Zyklen Anzahl von eins pro Jahr. Durch geringe Zyklenzahlen ergeben sich auch hohe Opportunitätskosten von 5,44 €/ (MWh·°C). Unter der Annahme, dass der Behälter Speicher (TTES) als herkömmlicher (Puffer-)Speicher mit einer Zyklen Anzahl von 100 pro Jahr betrieben wird, so wirken sich diese proportional auf die Opportunitätskosten aus, wodurch $\text{LCOE}_{\text{Opportunity}}$ zu 0,0544 €/ (MWh·°C) resultiert. Dies unterstreicht die Bedeutung hoher Zyklen Anzahl bei Speichern zur Kostendegression.

Tab. 1: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der energie-ökonomischen Bewertung der untersuchten Technologien für $\text{LCOE}_{\text{Opportunity}}$ (€/ (MWh·°C)) und potenzielle Steigerung der Kapazität (%/°C)

Technologie	$\text{LCOE}_{\text{Opportunity}}$ €/ (MWh·°C)	Steigerung Kapazität %/°C
Flachkollektor Einfachverglasung	0,67	2,0
Flachkollektor Doppelverglasung	0,54	1,6
Vakuummöhrnenkollektor mit Spiegelflächen	0,23	0,4
Geothermie	0,67	2,5
Wärmepumpe ¹	0,60	2,3
Abwärme	0,58	2,5
KWK-Gegendruckturbine ²	0,40	0,6
KWK-Entnahme-Kondensationsturbine ²	0,15	0,3
Rauchgaskondensation (Biomasseanlage)	0,036	0,22
Wärmenetz ³	0,62	2,9
Behälter Speicher (TTES) ⁴	5,44	2,5
Erdbecken Speicher (PTES) ⁵	2,33	2,5
Erdsonden Speicher (BTES) ⁵	2,25	2,5
Aquifer Speicher (ATES) ⁵	2,96	5,0

- 1 bezogen auf die reduzierte Antriebsleistung ($\hat{=}$ geringere Stromaufnahme)
- 2 bezogen auf die gesteigerte Stromerzeugung (P_d)
- 3 bezogen auf gesteigerte Übertragungskapazität. Würde die Übertragungskapazität als konstant angenommen und der Massenstrom reduziert werden, so würde LCOE Opportunity 0,15 €/ (MWh·°C) betragen.
- 4 bezogen auf saisonale Speicherung mit einem Zyklus pro Jahr (eine volle Be- und Entladung). Angenommen es handelt sich um einen Speicher mit 100 Zyklen pro Jahr, so würde LCOE Opportunity zu 0,0544 €/ (MWh·°C) resultieren.
- 5 bezogen auf saisonale Speicherung mit einem Zyklus pro Jahr.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

Niedrige Systemtemperaturen gelten als wesentliche Voraussetzung für eine massive Integration von alternativen Energiequellen in Wärmenetzen und somit zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung. Allerdings werden bestehende Versorgungsnetze durch Hochtemperatursysteme dominiert bzw. sind die Vorteile von Niedertemperatursystemen nicht oder unzureichend bekannt. Diese Arbeit liefert einen Beitrag um diese Lücke zu füllen.

Der innovative Ansatz der Arbeit liegt darin, dass mithilfe von energie-ökonomischen Bewertungen Kennzahlen entwickelt wurden, mit denen Effekte von reduzierten Systemtemperaturen auf Technologie-Ebene bewertet werden können. Der verfolgte Ansatz hilft dabei, einzelne Anlagen bzw. ganze Systeme bewerten zu können sowie erzielbare Potenziale und monetäre Einsparungseffekte evidenzbasiert aufzuzeigen.

Insgesamt wurden Untersuchungen zu neun Erzeugungstechnologien, zum Wärmenetz selbst sowie vier Speichertypen durchgeführt. Die Auswahl der Technologien wurde so erstellt, dass ein breites Spektrum für weiterführende Untersuchungen und Verwertungen zur Verfügung steht. Daher wurden zum einen bestehende und weit verbreitete Erzeugungstechnologien wie KWK-Anlagen aber auch neue und vielversprechende wie Wärmepumpen untersucht.

Bei den möglichen aufkommenden Erzeugungsformen Solarthermie, Geothermie, Wärmepumpe und Abwärme ist eine hohe Sensitivität der Opportunitäts-Energiegestehungskosten ($LCOE_{\text{Opportunity}}$) in Abhängigkeit der Temperaturniveaus festzustellen. Zukünftige Wärmenetze werden durch diversifizierte, alternative Wärmequellen dominiert sein. Dabei werden die Systemtemperaturen einen deutlich höheren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben im Vergleich zum bestehenden Erzeugungsmix, der durch KWK-Anlagen und Heizkessel dominiert ist. Daher müssen jetzt schon Maßnahmen zur Senkung der Systemtemperaturen ergriffen werden um Wärmenetze erfolgreich transformieren zu können.

LITERATUR

- Biermayr P., Dißauer C., Eberl M., Enigl M., Fechner H., Fürnsinn B., . . . Wopienka E. (2020). Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2019: Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie, Wärmepumpen und Windkraft. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK).
- BMNT & BMVIT. (2018). #mission2030 - Die österreichische Klima- und Energiestrategie. Wien: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus & Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.
- FGW (2020). Gas und Fernwärme in Österreich - Zahlenspiegel 2020. Wien: FGW – Fachverband der Gas- und Wärmeversorgungsunternehmen.
- Gössl M., Krutzler T., Schieder W., Schindler I., Storch A., Wiesenberger H., . . . Tichler, R. (2014). Beitrag von Fernwärme, -kälte und Erdgas zu energie- und umweltpolitischen Zielen. Wien: Umweltbundesamt GmbH im Auftrag des Fachverbands der Gas- und Wärmeversorgungsunternehmen (FGW).
- Mathiesen B., Petersen M., Nielsen K., Madsen O., Moos T., Senger J., . . . Jørgensen, J. (2018). Fernwärme und -kälte: Energieeffizienz für städtische Gegenden (Weißbuch). Copenhagen: State of Green.
- Schmidt R.-R., Basciotti D., Geyer R., Leoni P., Robbi S., Litzellachner A., . . . Moser M. (2018). heat_

- portfolio. Technische Grundlagen zur signifikanten Integration dezentral vorliegender alternativer Wärmequellen in Wärmenetze. Wien: AIT Austrian Institute of Technology GmbH. Von <https://www.energieforschung.at/projekte/296/technische-grundlagen-zur-signifikanten-integration-dezentral-vorliegender-alternativer-waermequellen-in-waermenetze> abgerufen
- Schmidt R.-R., Tichler R., Amann C., Schindler I. (2015). F&E-Fahrplan Fernwärme und Fernkälte: Innovationen aus Österreich. Wien: Klima- und Energiefonds.
- STATISTIK AUSTRIA (29. 05 2020). Energiebilanzen - Gesamtenergiebilanz Österreich 1970 bis 2018 (Detailinformation). Abgerufen am 29. Mai 2020 von https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html
- Totschnig G., Büchele R., Fritz S., Kranzl L., Nagler J., Ponweiser K., . . . Müller A. (2018). P2H-Pot: Potentiale, Wirtschaftlichkeit und Systemlösungen für Power-to-Heat. Wien: TU-Wien (Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe).
- Werner S. (2017). International review of district heating and cooling. In *Energy* 137 (2017) (S. 617-631). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.045>: ELSEVIER.

Kontakt Daten:

Roman Geyer

Giefinggasse 6

1210 Vienna

Email: roman.geyer@ait.ac.at