

Klimaneutralität durch Wärmenetze

Technisch-ökonomische, politische und gesellschaftliche Perspektiven der Wärmewende



Wärme macht etwa die Hälfte des gesamten Energieverbrauchs in Europa aus und basiert nach wie vor überwiegend auf klimaschädlichen fossilen Energieträgern. Um Klimaziele zu erreichen, sind daher große Veränderungen notwendig, die nur durch eine gesamtgesellschaftliche Wärmewende erreicht werden können. Meine Dissertation untersucht, welchen Beitrag Wärmenetze zu einem klimaneutralen Energiesystem leisten können, und wie ihr Potenzial voll ausgeschöpft werden kann. Um diese Frage zu beantworten, untersuche ich Wärmenetze aus drei interdisziplinären Perspektiven: der technisch-ökonomischen, der politischen und der gesellschaftlichen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine kosteneffiziente Wärmewende durch den Ausbau klimaneutraler Wärmenetze in Europa auf einen Anteil von 25 % erreicht werden kann. Um diese Versorgungsstruktur zu erreichen, ist ein integrierter Ansatz für die Regulierung von Wärmenetzen erforderlich, der die Markttransparenz erhöht und VerbraucherInnen partizipieren lässt.

Anna Billerbeck hat an der Universität Freiburg im Fachgebiet Energiewirtschaft promoviert.

Anna Billerbeck

Deutscher Studienpreis
2. Preis Sektion
Sozialwissenschaften

Der vorliegende Beitrag wurde beim Deutschen Studienpreis 2025 mit dem 2. Preis in der Sektion Sozialwissenschaften ausgezeichnet. Er beruht auf der 2024 an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg eingereichten Dissertation „District heating in a climate-neutral energy system – Modelling of transformation pathways and implications for policies“ von Dr. Anna Billerbeck.

Klimaneutralität durch Wärmenetze

Technisch-ökonomische, politische und gesellschaftliche Perspektiven der Wärmewende

Die Energiewende und die Bedeutung von Wärmenetzen

Der Klimawandel ist die wahrscheinlich größte globale Herausforderung unserer Zeit. Die Europäische Union (EU) hat in der Bekämpfung des Klimawandels eine Vorreiterrolle übernommen und sich ehrgeizige Klima- und Energieziele gesetzt, um ihre Treibhausgasemissionen kontinuierlich zu reduzieren und bis 2050 klimaneutral zu werden [1]. Im Energiesektor, der über 75% der Treibhausgasemissionen in der EU verursacht [2], ist der Anteil erneuerbarer Energien und damit ihr Beitrag zum Klimaschutz in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Während insbesondere die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien zugenommen hat, ist der Fortschritt im Wärmesektor deutlich langsamer. Da in Europa jedoch etwa die Hälfte des gesamten Energiebedarfs für Wärme zur Beheizung von Gebäuden und für den Wärmebedarf der Industrie verbraucht wird [3], ist eine zügige Transformation hin zu einem klimaneutralen Wärmesektor unerlässlich. Diese Transformation erfordert in den nächsten Jahren grundlegende Veränderungen auf der Angebots- und Nachfrageseite, die nur im Rahmen einer gesamtgesellschaftlichen Wärmewende erreicht werden können. Die Kontroversen um das „Heizungsgesetz“ haben in den letzten Jahren dazu geführt, dass die Wärmewende auch in Deutschland stärker in den Fokus der politischen und gesellschaftlichen Diskussion gerückt ist.

Wärmenetze (Nah- und Fernwärme) transportieren Wärme in Form von heißem Wasser durch unterirdische Leitungen von einem oder mehreren Erzeugern (z.B. einem Heizwerk) zu einer Vielzahl von Abnehmern (z.B. Haushalten oder Gewerbebetrieben). Insbesondere in dichtbesiedelten Gebieten stellen Wärmenetze eine energieeffiziente und wirtschaftliche Möglichkeit dar, klimaneutrale Wärmequellen in großem Maßstab zu integrieren. Dies gilt auch für Wärmequellen wie tiefe Geothermie oder Abwärme aus industriellen Prozessen, die für individuelle Heizungen ungeeignet sind. Zudem bieten Wärmenetze wertvolle Flexibilität, um den steigenden Anteil des schwankenden erneuerbaren Wind- und Solarstromangebots im

Stromnetz zu integrieren. Dies ist insbesondere durch große Wärmepumpen möglich, die Wärme aus Strom und Umgebungswärme erzeugen. Die Bundesregierung hat diese Vorteile erkannt und sich zum Ziel gesetzt, klimaneutrale Wärmenetze auszubauen und den Anteil erneuerbarer Energien und Abwärme in Wärmenetzen bis 2030 auf mindestens 50% und bis 2045 auf 100% zu erhöhen [4]. Der Aus- und Umbau von Wärmenetzen ist jedoch mit Herausforderungen auf unterschiedlichen Ebenen verbunden:

Regionalisierung. Eine zentrale Schwierigkeit ist die Einbindung klimaneutraler Wärmequellen, da diese im Vergleich zu konventionellen Anlagen wie Gas- oder Kohleheizwerken oft kleiner und von lokalen Gegebenheiten abhängig sind. Eine Einbindung von Geothermie ist nur in Gebieten mit geothermischen Vorkommen im Untergrund möglich, während die Verfügbarkeit von industrieller Abwärme von Umfang und Beschaffenheit der lokalen Industrie abhängt. Neben der Verfügbarkeit werden auch der Betrieb und die Steuerung von Wärmenetzen immer komplexer, da die Erzeugungsprofile der klimaneutralen Wärmequellen in Abhängigkeit von externen Faktoren wie Witterung oder Industrietätigkeit stärker schwanken.

Kompatibilität. Da klimaneutrale Wärmequellen in der Regel Wärme mit niedrigeren Temperaturen liefern, muss deren Nutzung oft mit einer Temperaturabsenkung in den Wärmenetzen einhergehen. Diese Temperaturabsenkung muss jedoch sowohl mit der Infrastruktur des Netzes als auch mit den Anforderungen der angeschlossenen Gebäude kompatibel sein, die ein bestimmtes Temperaturniveau benötigen. Daher ist ein integrierter Planungsansatz erforderlich, der die unterschiedlichen Bedarfe und technischen Einschränkungen berücksichtigt.

Marktstruktur. Zusätzlich besteht ein intensiver Wettbewerb mit anderen Heizsystemen, wie z.B. Wärmepumpen oder Pelletheizungen in Gebäuden. Da die Bezahlbarkeit der Wärmeversorgung im aktuellen Regime hoher Energiepreise stark im Fokus steht, stehen Wärmenetze unter erheblichem Kostendruck. Hohe anfängliche Infrastrukturkosten und das Risiko niedriger Anschlussraten aufgrund negativer Verbraucherwahrnehmungen erhöhen die Planungsunsicherheit und stellen eine weitere Hürde dar, die es zu überwinden gilt.

Vor diesem Hintergrund und mit dem Ziel, einen Beitrag zur Bewältigung der bestehenden Herausforderungen zu leisten, widmet sich meine Dissertation der übergeordneten Frage, welchen Beitrag Wärmenetze in einem kostenoptimalen klimaneutralen Energiesystem leisten können und wie wir dieses Potenzial durch technologische Transformation und politische Maßnahmen nutzen können. Um diese umfassende Forschungsfrage zu beantworten, werden in meiner Dissertation Wärmenetze interdisziplinär aus drei Perspektiven beforscht: der technisch-ökonomischen, der politischen und der gesellschaftlichen Perspektive. Die drei Perspektiven

ermöglichen die Berücksichtigung von Interdependenzen. Dies ist relevant, da die Wärmewende eine gesamtgesellschaftliche Querschnittsaufgabe darstellt, die von technischen, wirtschaftlichen, marktlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen sowie dem gesellschaftlichen Willen geprägt ist.

Welches technische System ist ökonomisch optimal?

Wie das Energiesystem der Zukunft aussehen kann, wird in der Wissenschaft intensiv diskutiert, wobei typischerweise modellbasierte Szenarioanalysen zum Vergleich unterschiedlicher Alternativen herangezogen werden. Während die optimale Konfiguration des gesamten Energiesystems noch unklar ist, herrscht in Teilfragen bereits ein breiter Konsens: So ist sich die Wissenschaft für den Stromsektor weitgehend einig, dass fossile Brennstoffe abgeschafft und der Ausbau erneuerbarer Energien, insbesondere Wind- und Sonnenenergie, schnell vorangetrieben werden sollten. Im Wärmesektor hingegen gibt es bisher weniger Übereinstimmung, und es wurden unterschiedliche Wege vorgeschlagen, deren Auswirkungen noch diskutiert werden.

Während Wärmenetze stark regionalisiert sind, basiert das Stromsystem auf einem europäischen Markt mit intensivem internationalem Stromhandel. Darüber hinaus wird Strom zunehmend für die Erzeugung von Wärme eingesetzt, insbesondere durch Wärmepumpen. Die Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten in der Szenarioanalyse ist für die Entwicklung robuster Modelle von entscheidender Bedeutung, da die Wechselwirkungen zwischen den beiden Systemen und die europäischen Stromhandelsströme die Bewertung der technischen Machbarkeit und der Kosten erheblich beeinflussen können. In meiner Dissertation analysiere ich daher die Entwicklung von Wärmenetzen in einem neuartigen, technisch-ökonomischen Energiesystemmodell, das alle Länder Europas umfasst und sowohl Strom als auch Wärmenetze adäquat abbildet. Die Ergebnisse sind in zwei Fachzeitschriften publiziert:

Die erste technisch-ökonomische Szenarioanalyse, die in der Fachzeitschrift *Energy Conversion and Management* veröffentlicht ist [5], vergleicht den Anteil von Wärmenetzen in einem zukünftigen, klimaneutralen Energiesystem mit anderen erneuerbaren Energieträgern, wie z.B. Wasserstoff. Die Ergebnisse zeigen, dass der Ausbau von Wärmenetzen und der Einsatz von Wärmepumpen vorteilhafter ist als die Erhöhung des Anteils von Wasserstoff oder synthetischem Methan an der Gebäudebeheizung. Die direkte Elektrifizierung der Wärmeversorgung über Wärmepumpen und Wärmenetze führt zu geringeren Investitionsbedarfen, niedrigeren Kosten und geringeren Energieimporten aus Ländern außerhalb Europas.

Notwendige Schritte zur Umsetzung des Szenarios sind zum einen ein deutlicher Ausbau dezentraler (Haushalts-) und zentraler (Groß-)Wärmepumpen, die ihren Ertrag in Wärmenetze einspeisen, sowie gleichzeitig ein Ausbau der europäischen Wärmenetze auf 25% der beheizten Flächen bis 2050.

Die zweite technisch-ökonomische Analyse ist in der Fachzeitschrift *Smart Energy* veröffentlicht [6] und vergleicht Szenarien mit unterschiedlichen Technologiemixen in europäischen Wärmenetzen. Die Ergebnisse zeigen, dass ein hoher Anteil von Großwärmepumpen sowie von Tiefengeothermie und industrieller Abwärme in Wärmenetzen zu den niedrigsten Kosten für das gesamte Energiesystem führt. Großwärmepumpen erreichen dabei als Schlüsseltechnologie einen Anteil von über 60% an der gesamten Wärmeerzeugung in Wärmenetzen. Die Modellrechnungen verdeutlichen, dass ein hoher Anteil an erneuerbarer Wärme, insbesondere aus Tiefengeothermie, signifikante Kostenvorteile für Wärmenetze bringt und somit zu niedrigeren Preisen für die VerbraucherInnen führen kann.

Die Ergebnisse beider Analysen haben weitreichende gesellschaftliche Implikationen, da sie aufzeigen, wie ein kosteneffizientes Energiesystem auf Basis einer klimaneutralen und nachhaltigen Wärmeversorgung gestaltet werden kann. Der gesellschaftliche und politische Beitrag der Ergebnisse liegt insbesondere in der Konsensbildung: Weitere Studien mit unterschiedlichen methodischen Ansätzen sind notwendig, um die Robustheit der erzielten Ergebnisse zu demonstrieren und einen gesellschaftlichen Konsens zu erreichen. Dieser Konsens ist Voraussetzung dafür, dass die Gesellschaft die Technologien akzeptiert, in sie investiert und damit den Wandel hin zu einer klimaneutralen Energieversorgung aktiv mitgestaltet.

Wie werden Wärmenetze erfolgreich reguliert?

Während zur technischen Ausgestaltung von Wärmenetzen umfangreiche Literatur vorliegt, sind die politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen bislang wenig erforscht. Ein tieferes Verständnis der Vielfalt bestehender politischer Rahmenbedingungen sowie ihrer Besonderheiten und Grenzen ist jedoch entscheidend, um die Potenziale klimaneutraler Wärmenetze auszuschöpfen. In meiner Dissertation untersuche ich daher, wie Regulierungen und Förderungen den Ausbau, die Gestaltung und die marktliche Integration von Wärmenetzen in Europa beeinflussen. Im Folgenden möchte ich die wichtigsten Ergebnisse dieser Analyse, die in der führenden Fachzeitschrift *Energy Policy* erschienen ist [7], vorstellen und ihre gesellschaftliche Relevanz erläutern.

Die Analyse der bestehenden Politiken in 23 europäischen Ländern zeigt, dass signifikante Unterschiede in der Form, Intensität und Herangehensweise der

Regulierung und Förderung von Wärmenetzen bestehen. Unterschiede bestehen insbesondere bei der Regulierung von Eigentum und Betrieb der Wärmenetze, der Regulierung der Endkundenpreise, der Regulierung des Anschlusses und der Nutzung durch VerbraucherInnen, der Regulierung des Zugangs von unabhängigen Erzeugern sowie dem Einsatz von staatlichen Förderprogrammen und der Verwendung von CO₂-Preisen. Während einige Länder strenge Regulierungen und umfassende Förderung nutzen, verlassen sich andere in geringerem Maße auf solche Markteingriffe zur politischen Steuerung.

Die bestehenden Politiken verfolgen dabei unterschiedliche Ziele und adressieren verschiedene Anforderungen und Probleme von Wärmenetzen. Eine Besonderheit ist, dass Wärmenetze natürliche Monopole sind und die angeschlossenen VerbraucherInnen nicht zwischen Anbietern wechseln können. Dies kann dazu führen, dass Anbieter ihre Monopolstellung durch sehr hohe Endkundenpreise ausnutzen. Bestehende Regulierung zielt daher darauf ab, VerbraucherInnen zu schützen, z.B. durch Politiken zur Gewährleistung fairer und transparenter Preise. In Dänemark dürfen Wärmenetze beispielsweise keine Gewinne erwirtschaften. Die Preise dürfen daher nur der Kostendeckung dienen, nicht aber wirtschaftlichen Gewinninteressen. Eine weitere Herausforderung betrifft die Wirtschaftlichkeit klimaneutraler Wärmenetze, die mit neuen Investitionen und dadurch zum Teil mit höheren Kosten verbunden sind. Politische Antworten konzentrieren sich auf die Reduzierung dieser Kosten, z.B. durch finanzielle Förderprogramme für erneuerbare Wärmeerzeugungsanlagen. In Frankreich werden beispielsweise mit dem „Fonds Chaleur“ klimaneutrale Wärmenetze finanziell gefördert. Auch in Deutschland gibt es mit der „Bundesförderung für effiziente Wärmenetze“ eine finanzielle Unterstützung.

Die Analyse zeigt weiterhin, dass sowohl eine hohe Regulierungsintensität als auch ein geringes Maß an regulatorischen Eingriffen mit einem hohen Anteil an klimaneutralen Wärmenetzen verbunden sein können. Allerdings zeichnen sich Tendenzen ab: Während eine Anschlusspflicht für VerbraucherInnen natürlicherweise zu hohen Anschlussquoten führt (z.B. in Litauen und Estland), gehen darüber hinaus umfassende staatliche Fördermaßnahmen oft mit einem höheren Anteil an erneuerbaren Energien in Wärmenetzen einher (z.B. in Dänemark, Schweden und Frankreich). Weiterhin spielen auch nicht-regulatorische Faktoren eine Rolle, darunter unter anderem hohe Potenziale an erneuerbaren Energien, eine geringe Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen und ein historisch früher Fokus auf Klimapolitik.

Die Gestaltung und Umsetzung von Politiken beeinflusst grundsätzlich nicht nur deren eigene Wirksamkeit bei der Erreichung der angestrebten Ziele. Häufig stehen Politiken in Wechselwirkung zueinander. Eine Anschlusspflicht für

VerbraucherInnen erhöht die Investitionssicherheit für Anbieter und kann dadurch zu niedrigeren Kosten und Preisen führen. Gleichzeitig kann sie aber auch zu höheren Preisen führen, da die VerbraucherInnen den Anbietern stärker ausgeliefert sind. Um diesen unerwünschten Effekt zu mildern, sind wirksame Preisregulierungen erforderlich. Eine Möglichkeit, die negativen Auswirkungen der Anschlusspflicht zu reduzieren, könnte auch darin bestehen, die Partizipation von VerbraucherInnen durch spezifische Eigentumsstrukturen zu erhöhen. Sind Wärmenetze in Verbraucherhand, besteht kein Anreiz für hohe Preise. Politiken, die auf die Regulierung öffentlicher oder partizipativer Eigentumsverhältnisse abzielen, gehen daher auch das Problem hoher Preise aufgrund natürlicher Monopole an und können die Notwendigkeit einer strengen Preisregulierung verringern.

Die Analyse verdeutlicht daher die politische und gesellschaftliche Notwendigkeit, einen regulatorischen Rahmen zu schaffen, der alle Ziele und deren potentielle Konflikte in einem integrierten Ansatz berücksichtigt. Hierbei kann Deutschland von seinen europäischen Nachbarn lernen und beispielsweise den Verbraucherschutz durch eine verbesserte Preisregulierung stärken. Mit der Fortführung und dem Ausbau der „Bundesförderung für effiziente Wärmenetze“ können ferner die Marktakteure bei Investitionen in klimaneutrale Wärmenetze unterstützt werden.

Was sind Barrieren gesellschaftlicher Akzeptanz?

Die Energiewende und die mit ihr einhergehenden technischen, ökonomischen und sozialen Veränderungen werden bekanntermaßen gesellschaftlich kontrovers diskutiert. Für den Ausbau klimaneutraler Wärmenetze ist demnach ein Verständnis der gesellschaftlichen Wahrnehmung sowie der verbraucherseitig akzeptanzfördernden und -mindernden Faktoren essentiell. Die soziale Dimension der Wahrnehmung und Akzeptanz von Wärmenetzen wurde daher ebenfalls von mir untersucht. Um die Heterogenität europäischer Gesellschaften abzubilden, wurde hierfür eine repräsentative Umfrage mit fast 5000 Teilnehmenden in neun europäischen Ländern durchgeführt. Die Auswertungen dieser Umfrage sind in der Fachzeitschrift *Energy Policy* veröffentlicht [8]:

Die Ergebnisse zeigen, dass NutzerInnen Wärmenetze deutlich positiver bewerten als Nicht-NutzerInnen. Darüber hinaus haben Befragte mit einem überdurchschnittlichen Umweltbewusstsein eine signifikant bessere Wahrnehmung von Wärmenetzen als Befragte mit einem geringeren Umweltbewusstsein. Gleiches gilt für Befragte mit einer höheren Technikaffinität. Der größte Unterschied zeigt sich beim Vertrauen in die Politik: Ein hohes Vertrauen in politische Entscheidungsträger führt zu einer signifikant besseren Bewertung von Wärmenetzen. Im

Ländervergleich zeigt sich eine besonders hohe Akzeptanz in Dänemark, gefolgt von Schweden, Polen, Italien und Deutschland. In den Niederlanden und in Litauen ist die Wahrnehmung weniger positiv, während Frankreich und die Slowakei im Mittelfeld liegen. Ein Vergleich zwischen den Ländern zeigt auch, dass Haushalte in Ländern ohne Anschlusspflicht und mit überwiegend öffentlichen oder partizipativen Eigentumsverhältnissen Wärmenetze signifikant positiver wahrnehmen, zufriedener mit der Nutzung sind und den Preis positiver bewerten als Haushalte in Ländern mit Anschlusspflicht und mit mehr Privatbesitz an Wärmenetzen. Übergreifend zeigen die Ergebnisse, dass nicht nur die formale Regulierung entscheidend ist, sondern dass auch die Kombination von Politiken, die die Markttransparenz erhöhen und die VerbraucherInnen einbeziehen, wesentlich zu einer positiven Bewertung von Wärmenetzen beitragen können.

Die gesellschaftliche Relevanz dieser Analyse liegt in der Identifikation von Faktoren, die eine positive Wahrnehmung und hohe Akzeptanz von Wärmenetzen fördern. Wärmenetze sind in der Öffentlichkeit noch wenig bekannt. Eine bessere Kenntnis der Technologie und ihrer Vorteile kann die Wahrnehmung jedoch verbessern. Daher können politische Maßnahmen wie Informationskampagnen oder die Einbindung der Bevölkerung in Diskussionen über den (Umwelt-)Nutzen dazu beitragen, die Akzeptanz und Nutzung von Wärmenetzen zu erhöhen. Darüber hinaus müssen politische Entscheidungsträger Vertrauen aufbauen, was durch Entscheidungen auf der Basis verlässlicher und relevanter Informationen im öffentlichen Interesse erreicht werden kann. Da sich eine Anschlusspflicht negativ und die öffentliche, partizipative Eigentümerschaft positiv auf die Wahrnehmung von Wärmenetzen auswirken, sollte dies bei der regulatorischen und marktlichen Ausgestaltung von Wärmenetzen in Deutschland entsprechend berücksichtigt werden.

Beitrag und Relevanz

Durch eine wissenschaftlich fundierte Analyse der technischen, regulatorischen und gesellschaftlichen Faktoren leistet meine Dissertation einen Beitrag zur Umsetzung der Wärmewende in Deutschland und Europa. Die interdisziplinäre Kombination der drei Perspektiven zeigt auf, wie ein kostenoptimales Energiesystem technisch ausgestaltet werden kann, welche politischen Maßnahmen die Umsetzung fördern oder behindern und welche Faktoren der gesellschaftlichen Akzeptanz berücksichtigt werden sollten.

Die Szenarioanalysen zeigen, dass ein europäisches Energiesystem, das auf einer erneuerbaren Stromversorgung und einem starken Ausbau der Wärmenetze sowie einer hohen Verbreitung von zentralen und dezentralen Wärmepumpen basiert, die

geringsten Kosten bei der Transformation zu einem klimaneutralen Energiesystem aufweist. Um dieses Ziel zu erreichen, ist ein integrierter Ansatz bei der Entwicklung von Politiken für Wärmenetze erforderlich, der die Markttransparenz erhöht, monopolistische Marktstrukturen adressiert und VerbraucherInnen partizipativ einbezieht.

Die Ergebnisse meiner Dissertation sind für politische Entscheidungsträger auf europäischer, nationaler und kommunaler Ebene sowie alle am Aus- und Umbau von Wärmenetzen beteiligten Akteure relevant: Politiker, Investoren, Unternehmen und Privatpersonen, die klimaneutrale Wärmenetze ausbauen wollen, können ein Bewusstsein für den kostenoptimalen Anteil und Technologiemark in Wärmenetzen aufbauen, ein Verständnis für günstige politische Rahmenbedingungen und Regulierungen entwickeln und schließlich Erkenntnisse darüber gewinnen, welche Faktoren die Akzeptanz dieser Technologien fördern. In der aktuellen gesellschaftlichen Situation, in der Entscheidungen über das zukünftige Energiesystem politisch kontrovers diskutiert werden, können die wissenschaftlichen Ergebnisse meiner Dissertation einen sachlichen Diskurs unterstützen, damit wir die Wärmewende erfolgreich meistern und Klimaneutralität erreichen.

Referenzen

- [1] European Commission: 2050 long-term strategy. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en.
- [2] European Commission: Renewable energy targets. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets_en.
- [3] Heat Roadmap Europe (2017): Heating and Cooling: Facts and Figures. The transformation towards a low-carbon Heating & Cooling sector. https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2019/03/Brochure_Heating-and-Cooling_web.pdf.
- [4] Bundesregierung (2024): Kommunale Wärmeplanung für ganz Deutschland. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/waermeplanungsgesetz-2213692>.
- [5] Billerbeck, A.; Kiefer, C. P.; Winkler, J.; Bernath, C.; Sensfuß, F.; Kranzl, L.; Müller, A.; Ragwitz, M. (2024): The race between hydrogen and heat pumps for space and water heating: A model-based scenario analysis. In: Energy Conversion and Management, 299, p. 117850. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117850>.
- [6] Billerbeck, A.; Bernath, C.; Manz, P.; Deac, G.; Held, A.; Winkler, J.; Kök, A.; Ragwitz, M. (2024): Integrating district heating potentials into European energy system modelling: An assessment of cost advantages of renewable and excess heat. In: Smart Energy, 15, p. 100150. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2024.100150>.

- [7] Billerbeck, A.; Breitschopf, B.; Winkler, J.; Bürger, V.; Köhler, B.; Bacquet, A.; Popovski, E.; Fallahnejad, M.; Kranzl, L.; Ragwitz, M. (2023): Policy frameworks for district heating: A comprehensive overview and analysis of regulations and support measures across Europe. In: Energy Policy, 173, p. 113377.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113377>.
- [8] Billerbeck, A.; Breitschopf, B.; Preuß, S.; Winkler, J.; Ragwitz, M.; Keles, D. (2024): Perception of district heating in Europe: A deep dive into influencing factors and the role of regulation. In: Energy Policy, 184, p. 113860.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113860>.