

Langfristige Prognose für den Fernwärmebedarf eines Nahwärmenetzes unter Berücksichtigung demografischer Entwicklungen

Lukas Gnam, Christian Pfeiffer, Markus Puchegger

Forschung Burgenland GmbH, Campus 1, 7000 Eisenstadt,
+43 5 7705-5475, lukas.gnam@forschung-burgenland.at

Kurzfassung: In dieser Arbeit wird ein Modell zur Prognose des Fernwärmebedarfs von Nahwärmenetzen für die Jahre 2030 und 2050 unter Berücksichtigung von Klima- und demografischen Entwicklungen vorgestellt. Dabei wird mit einer leicht rückläufigen Entwicklung der Bevölkerungszahlen, einer steigenden Anzahl an Wohnungen und Gebäuden insgesamt einem Anstieg der Beschäftigten in der Industrie gerechnet. Die Ergebnisse zeigen eine generelle Zunahme der notwendigen Wärmeenergie, eine erhöhte Spitzenleistung im Szenario 2050 sowie einen deutlich erhöhten Wärmebedarf für Kühlung im Sommer unter der Annahme der Nutzung sorptionsgestützter Kühlung. Im Falle der Modellregion ist die Wärmeversorgung mit der bestehenden Infrastruktur bis ins Jahr 2030 gesichert, darüberhinausgehend sind jedoch Erweiterungen erforderlich.

Keywords: Wärmebedarf, Kühlbedarf, Klimaszenarien, Nahwärmenetz, demografische Entwicklung

1 Einleitung

Die Energiewende ist in vollem Gange und führt dazu, dass die bestehenden Infrastrukturen hinsichtlich Bereitstellung und Umwandlung jedweder Art von Energie sich in einem grundlegenden Veränderungsprozess wiederfinden. Der vermehrte Einsatz von Technologien zur Bereitstellung erneuerbarer Energie gepaart mit dem immer weiter steigenden Energiebedarf führt dazu, dass die Investitionsplanung für ein zukunftsfittes und effizient gestaltetes Energiesystem eine immer größer werdende Rolle einnimmt [1]. Um Maßnahmen für die Veränderung bestehender Energienetze bestmöglich und langfristig vorausplanend durchführen zu können, ist es von essentieller Bedeutung die zukünftige Energiebedarfssituation zu kennen. Als integraler Bestandteil für eine solche Prognose dient die Entwicklung der Bevölkerungszahlen, die sowohl direkten (z.B. Heizen) als auch indirekten Einfluss (z.B. mehr Gewerbe- und Industriebetriebe) auf den Energiebedarf haben. Nebenher ist das Wissen über die zukünftige demografische Entwicklung eine bedeutende Entscheidungsgrundlage für die Infrastrukturplanung (z.B. Raumplanung, Stadtentwicklungskonzepte), welche einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Versorgungsinfrastrukturen haben. Zwar liegen Energieszenarien unter Berücksichtigung demografischer Gegebenheiten bereits vor, kleinräumige Vorhersagemodelle für Nahwärmenetze werden dabei allerdings nicht berücksichtigt.

Auch im Bereich der Nah- und Fernwärmenetze sind neben dem generellen Ausbau der Erneuerbaren grundlegende Änderungen in den Rahmenbedingungen absehbar, die eine

andere Herangehensweise in Planung und Betrieb von Wärmenetzen erfordern. Aktuelle Diskussionen lassen darauf schließen, dass fixe geförderte Einspeisetarife künftig wohl durch Marktprämienmodelle oder ähnliche marktbasierende Systeme abgelöst werden [2],[3].

Ziel dieser Arbeit ist es daher, ein Modell zur Prognose des zukünftigen Fernwärmebedarfs von Nahwärmenetzen basierend auf einer Abschätzung der zukünftigen demografischen Struktur zu entwickeln. Die Wärmebedarfsprognose wird gemeinsam mit der Betrachtung zweier unterschiedlichen Szenarien für die Klimaentwicklung für die Jahre 2030 und 2050 durchgeführt. Ein simplifiziertes Fernwärmemodell eines Nahwärmenetzes einer österreichischen Kleinstadt dient in dieser Arbeit als Modellregion für die Evaluierung dieser Prognosemodelle. Die Prognose kann als Grundlage für künftige, ökonomisch motivierte Änderungen der Wärme- und Kältebereitstellung im Fernwärmenetz dienen.

2 Prognosemodell

Das gegenständliche Modell zur Prognose des langfristigen Fernwärmebedarfs eines Nahwärmenetzes ist in vier aufeinander aufbauende Phasen strukturiert. Zunächst wird der Wärmebedarf der untersuchten Region anhand eines nichtlinearen autoregressiven Ansatzes mit exogenen Einflussfaktoren (NARX) modelliert (Kapitel 2.1). Unter Berücksichtigung der klimatischen (Kapitel 2.2) und demografischen (Kapitel 2.3) Entwicklungen kann der Fernwärmebedarf der interessierenden Zeiträume disaggregiert werden. Hierfür kommt in einem abschließenden Schritt abermals das NARX-Modell zum Einsatz.

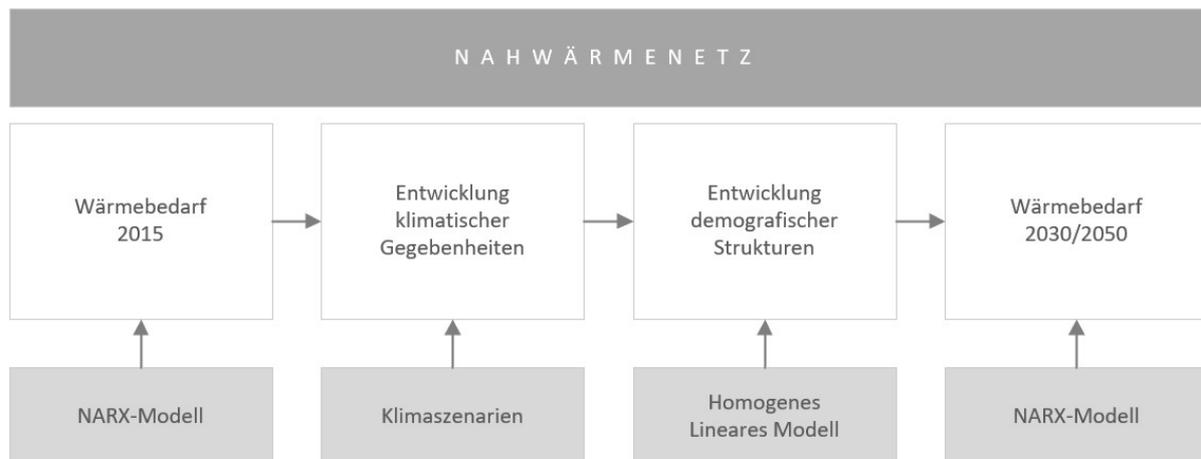


Abbildung 1: Prognosemodell

2.1 Modell zur Prognose des Fernwärmebedarfs

Neben anderen gängigen Methoden zur Prognose des Wärmebedarfs, wie beispielsweise k-nearest Neighbour und Support Vector Machines [4], sind autoregressive Modelle eine Alternative zur prädiktiven Regelung der Wärmebereitstellung. Als Grundlage für die Vorhersage des Fernwärmebedarfs der betrachteten Modellregion dient in der vorliegenden Arbeit ein nichtlineares autoregressives Modell mit exogenen Einflussfaktoren (NARX) [5].

Das hier verwendete NARX-Modell von Steindl et al. [6] stellt einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen vergangenen Eingängen, vergangenen Ausgängen und dem vorhergesagten Wert her:

$$y(t) = f\{y(t-1), \dots, y(t-n_y), u(t), u(t-1), \dots, u(t-n_u)\} + e(t) \quad (1)$$

Dabei bezeichnen $u(t)$ die exogenen Eingangswerte, $y(t)$ die entsprechenden Ausgangswerte des Modells zum Zeitpunkt t . Die Ordnung dieses dynamischen Modells wird durch n_y und n_u bestimmt, wobei $n_u \geq 0$ und $n_y \geq 1$ gilt. In der vorliegenden Arbeit fließen als relevante exogene Einflussfaktoren $u(t)$ Außentemperatur, Luftfeuchtigkeit sowie Wochentag der Messung als in das Prognosemodell ein.

Die nichtlineare Funktion f wird durch ein neuronales Netz approximiert, wobei ein vorwärts gerichtetes, vollständig verbundenes Perzeptron mit einer Eingangsschicht, einer Ausgangsschicht und einem Hidden-Layer zum Einsatz kommt. Die Eingangsschicht sowie der Hidden-Layer verwenden die Rectified Linear Unit (ReLU) Funktion als Aktivierungsfunktion:

$$f(t) = \max(0, x) \quad (2)$$

Für die Ausgangsschicht wird die Sigmoid-Funktion als Aktivierungsfunktion herangezogen:

$$f(t) = \frac{1}{1+e^{-t}} \quad (3)$$

Der Adam-Optimierungsalgorithmus [7] gewährleistet die Anpassung der Gewichte der einzelnen Neuronen.

2.2 Berücksichtigte Klimaszenarien

Es werden zwei Klimaszenarien („Business-as-usual“ und „Klimaschutz“) [8] in der Prognose berücksichtigt und deren Einfluss auf den Fernwärmebedarf evaluiert.

Das „Business-as-usual“-Szenario würde bei ungebremsten Treibhausgasemissionen eintreten (Treibhausgasszenario RCP8.5). Demgegenüber enthält das Szenario „Klimaschutz“ wirksame Klimaschutzmaßnahmen (RCP4.5), bei dem sich die Emissionen bis 2080 bei rund der Hälfte des heutigen Niveaus einpendeln. Bei den berücksichtigten Klimaszenarien handelt es sich um Modell-Ensembles, die 13 einzelne Klimamodelle miteinbeziehen und somit eine größere Bandbreite an möglichen Klimaentwicklungen abdecken.

Für beide Szenarien ist bis zum Jahr 2050 durchschnittlich mit einer wesentlichen Zunahme der Temperatur zu rechnen, wobei die Zunahme der mittleren Temperatur im Winter (+1,5°C bis +1,6°C) und Sommer (+1,3°C bis +1,4°C) beinahe ident ist.

2.3 Modell zur Identifikation des Einflusses demografischer Strukturen auf den Fernwärmebedarf

Das beschriebene Prognosemodell basiert auf den im Erhebungszeitraum 2015 gegebenen demografischen Strukturen der betrachteten Modellregion. Berücksichtigt werden dabei die Anzahl der Gebäude (Gewerbe, Industrie und Wohneinheiten), die Bevölkerungszahl, sowie die Beschäftigten in der Industrie.

Anhand der Bevölkerungsprognose für die betrachtete Modellregion [9] sowie der weiteren Inputgrößen wird der Fernwärmebedarf mit einem homogenen linearen Modell in die Jahre 2030 und 2050 extrapoliert:

$$y_t = \sum_{j=1}^m \beta_j x_{tj} + \varepsilon_t \quad (4)$$

Dabei sind y_t der Fernwärmebedarf der betrachteten Modellregion im Zeitraum t , x_{tj} die Eingangsgröße j im Zeitraum t , β_j die Koeffizientenschätzer zur Eingangsgröße j und ε ein Fehlerterm, welcher der Normalverteilungsannahme folgt [10]. Die extrapolierten Werte liefern sodann einen Anpassungsfaktor für den Fernwärmebedarf der betrachteten Zeiträume auf Basis veränderter demografischer Strukturen der Modellregion.

3 Ergebnisse

3.1 Demografie, Fernwärmebedarf und Modellannahmen

Hinsichtlich der demografischen Entwicklungen im Versorgungsgebiet des Netzes wurden folgende Annahmen auf Basis der Ausgangssituation getroffen:

Tabelle 1: Annahmen zur demografischen Entwicklung der Modellregion

Jahr	2015	2030	2050
Bevölkerungszahl	2.172	-1,6%	-7,1%
Anzahl Wohnungen	657	+13,5%	+24,7%
Anzahl Gebäude	501	+2,7%	+5,1%
Anzahl Beschäftigte in der Industrie	130	+22,0%	+45,7%

Es wird von einer Bevölkerungszahl von 2.172 EinwohnerInnen ausgegangen, die sich auf 657 Wohnungen verteilt. Insgesamt gibt es 501 Gebäude (darin enthalten Wohnbauten, Gewerbe- und Industriegebäude). In den ansässigen Betrieben sind 130 Personen beschäftigt. Für die Jahre 2030 bis 2050 wird eine leicht rückläufige Entwicklung der Bevölkerungszahlen angenommen, die aufgrund anhaltender Abwanderungen aus der Modellregion zustande kommen. Demgegenüber setzt sich der Trend zu kleineren Haushalten weiter fort [11]. Dies führt in den betrachteten Szenarien insgesamt zu einer wachsenden Zahl an Wohneinheiten. Zudem wird mit einer steigenden Anzahl an Gebäuden insgesamt und in Hinblick auf positive Effekte der Digitalisierung einem Anstieg der Beschäftigten in der Industrie gerechnet [12].

Die Abbildung 2 zeigt zwei typische Lastgänge für den Wärme- und Kältebedarf des Jahres 2015 in der Modellregion im Sommer (links) sowie im Winter (rechts). Während im Winter Leistungen von rund 600 kW erzielt werden, liegt der Wärmebedarf im Sommer mit Leistungen von rund 200 kW klarerweise deutlich darunter. Unter der Annahme einer sorptionsgestützten Kühlung liegt vorwiegend Wärmebedarf für Kühlung vor.

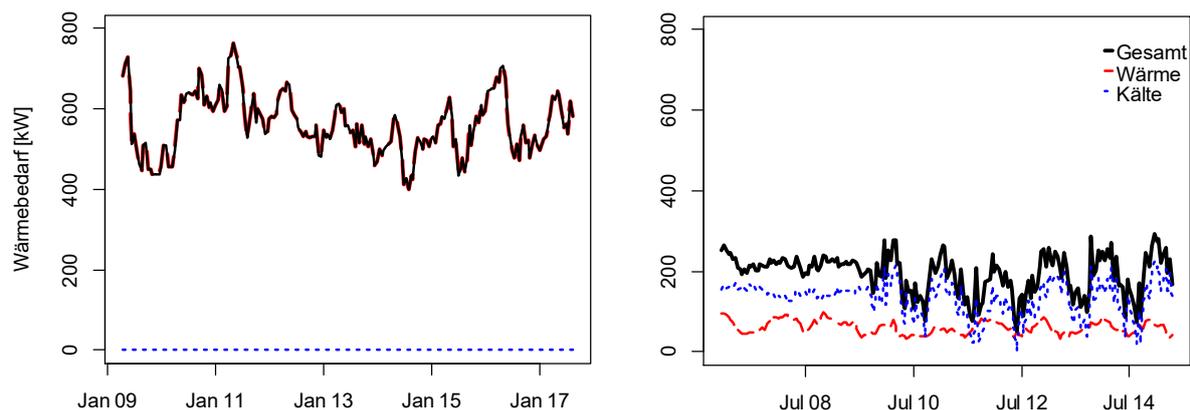


Abbildung 2: Gesamt-, Wärme- und Kältebedarf des Jahres 2015

Insgesamt beträgt der Wärmebedarf im Jahr 2015 in der Modellregion 2.618 MWh. Auf Basis historischer Daten zu Wärmebedarf und den zuvor angeführten Inputgrößen wurde ein homogenes lineares Modell berechnet, um den geschätzten Gesamt-Wärmebedarf für die Jahre 2030 und 2050 zu erhalten. In der Tabelle 2 sind die Parameter des gegenständlichen Modells zur Schätzung des Gesamt-Fernwärmebedarfs gelistet.

Tabelle 2: Parameter des homogenen linearen Modells zur Schätzung des Gesamt-Fernwärmebedarfs

Einfluss auf den Gesamt-Fernwärmebedarf	b_j^1	β_j^2	se ³
Bevölkerungszahl	-5,06 ⁺	-0,19	4,19
Anzahl Wohnungen	-5,51 [*]	-0,29	3,23
Anzahl Gebäude	29,69 [*]	0,37	20,04
Anzahl Beschäftigte in der Industrie	12,14	0,15	11,64

¹ Koeffizientenschätzer; ² standardisierter Koeffizientenschätzer; ³ Standardfehler; ⁺ p<0,10; ^{*} p<0,05; ^{**} p<0,01

Im gegenständlichen homogenen linearen Modell sind die größten Einflussfaktoren die Anzahl der Gebäude und Wohnungen, die in der Modellregion vorhanden sind. Während die Anzahl der Gebäude einen moderaten positiven Einfluss auf den Fernwärmebedarf hat ($\beta_3 = 0,37$), reduziert die Errichtung jeder weiteren Wohnung den Wärmebedarf der Modellregion ($\beta_2 = -0,37$). Dies könnte dem besseren energetischen Standard bei Neubauten geschuldet sein. Aufgrund möglicher Wechselwirkungen, die in diesem vereinfachten Modell nicht untersucht wurden, weist auch die Bevölkerungszahl einen schwachen negativen Einfluss auf den Fernwärmebedarf auf ($\beta_1 = -0,19$). Demgegenüber gibt es einen schwachen, nichtsignifikanten Einfluss der Beschäftigtenzahl in der Industrie auf den Fernwärmebedarf der Modellregion ($\beta_4 = 0,15$).

Eine Extrapolation des Fernwärmebedarfs auf die Jahre 2030 und 2050 liefert sodann einen Anpassungsfaktor als Grundlage zur Berechnung der Jahreslastgänge der Prognosejahre.

3.2 Prognostizierter Fernwärmebedarf für die Jahre 2030 und 2050

Unter Berücksichtigung der Anpassungsfaktoren wurden Wärmelastgänge für die Jahre 2030 und 2050 berechnet. Die Lastkurven zeigen in den Jahren 2030 und 2050 tendenziell höhere Wärmebedarfe, sowohl im Szenario „Klimaschutz“, als auch im „Business-as-usual“-Szenario. Die Prognosen zeigen generell geringere Frequenzen als das Basislinie aus 2015, die an den Wochenenden jeweils durch Ausschläge nach oben hin gekennzeichnet sind. Diese fallen modellbedingt an, da bei der gegenständlichen Parametrierung des NARX-Modells die kalendarischen Inputgrößen im Vergleich zu Außentemperatur und Luftfeuchtigkeit eine geringere Gewichtung erhielten.

Die Abbildung 3 liefert einen auszugsweisen Vergleich des Wärmebedarfs für den Monat Dezember. Charakteristisch für die Wintermonate der Prognosejahre, wird tendenziell ein geringerer Wärmebedarf vorausgesagt. Zudem erhöht sich der Wärmebedarf in den Wintermonaten in beiden Szenarien nur unwesentlich mit der Zeit, zumal im Jahr 2050 ähnlich hohe Werte prognostiziert werden wie 2030. Zum einen steigen die Temperaturen durch den Klimawandel signifikant an, was den Wärmebedarf im Winter grundsätzlich eindämmt. Zum anderen wird dieser Effekt mit der wachsenden Anzahl an Gebäuden ausgeglichen.

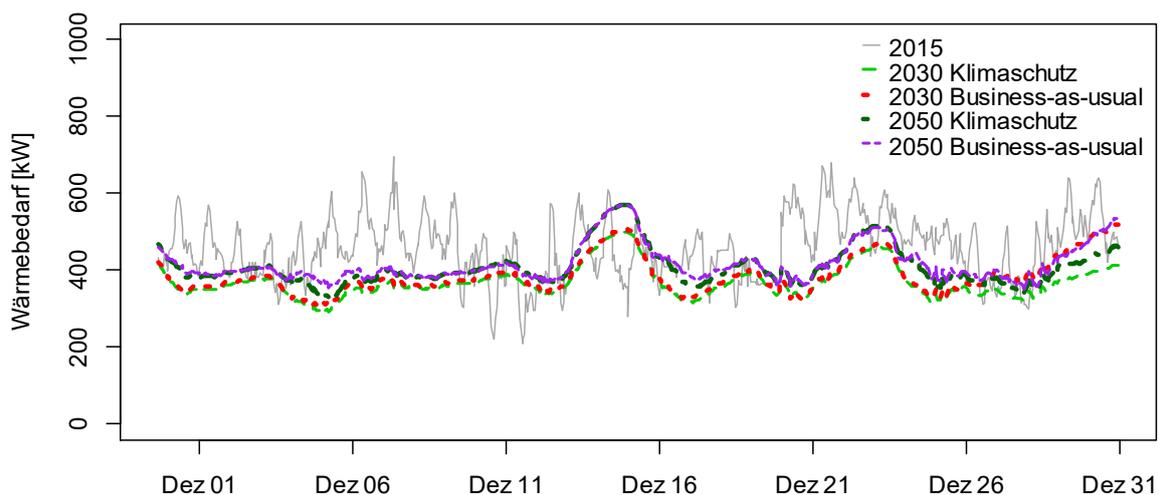


Abbildung 3: Vergleich Wärmebedarfe 2015-2030-2050 nach Klimaszenario im Monate Dezember

Demgegenüber birgt die Abbildung 4 gänzlich konträre Information. Ein Vergleich des Wärmebedarfs für den Monat Juli zeigt signifikant höhere Werte in den Prognosejahren 2030 und 2050. Dieser Trend setzt sich auch in den verbleibenden Sommermonaten fort. Aufgrund steigender Temperaturen entsteht vermehrt Bedarf für Kühlenergie, der durch die Kombination mit einer erhöhten Industriedichte, der damit einhergehenden wachsenden Anzahl an Gebäuden und und Gebäudeflächen noch verschärft wird. Unter der Annahme einer sorptionsgestützten Kühlung hat dieser direkte Auswirkungen auf den Wärmebedarf im Sommer.

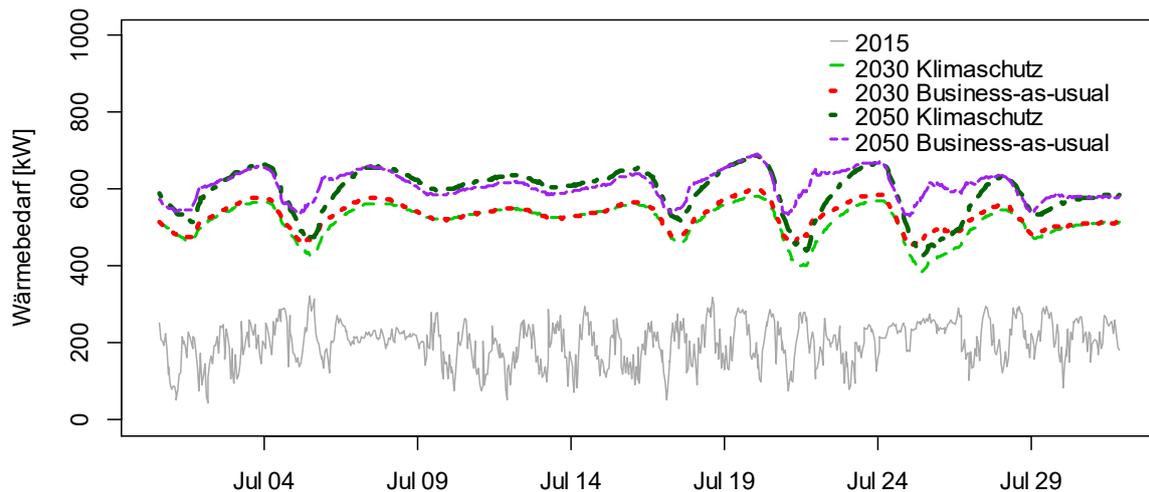


Abbildung 4: Vergleich Wärmebedarfe 2015-2030-2050 nach Klimaszenario im Monat Juli

In der Abbildung 5 ist ein Vergleich der Jahresdauerlinien der Jahre 2015, 2030 und 2050 unter Berücksichtigung der beiden Szenarien „Klimaschutz“ sowie „Business-as-usual“ dargestellt. Hierbei wird einerseits ersichtlich, dass im Prognosejahr 2050 Spitzenlasten von bis zu 1.000 kW erreicht werden. Andererseits sind die Schwachlastphasen durch vergleichsweise hohe Leistung gekennzeichnet, zumal in den Jahren 2030 und 2050 äußerst wenige Phasen unter 100 kW prognostiziert werden.

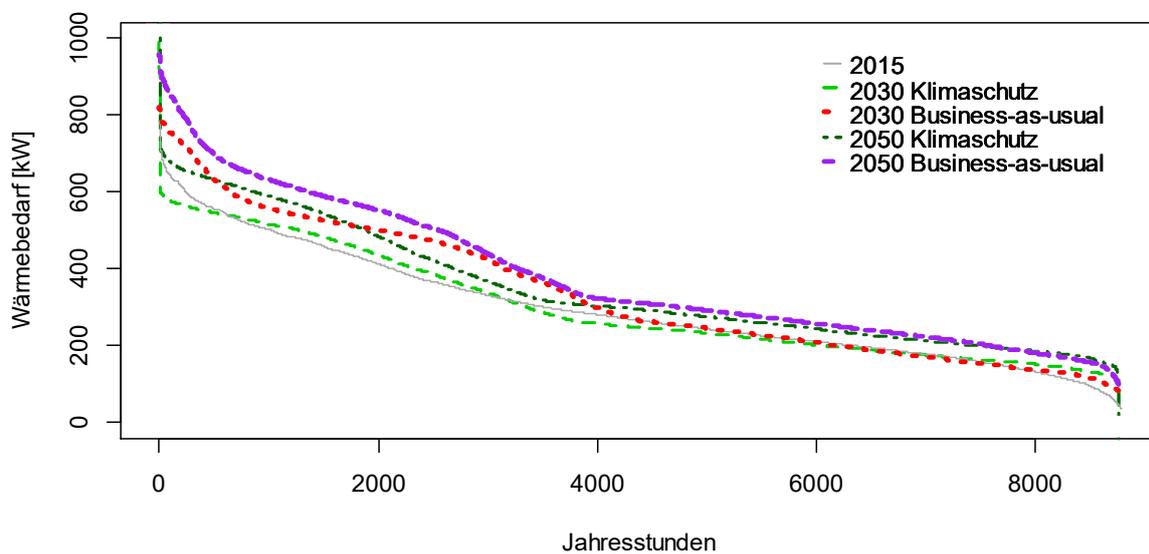


Abbildung 5: Vergleich der Jahresdauerlinien 2015-2030-2050 nach Klimaszenarien

Einen weiteren nennenswerten Aspekt liefert das Klimaschutz-Szenario 2030, welches wiederum eine marginale Dauer an Spitzenlasten um 1.000 kW vorhersagt. So werden in diesem Szenario schwerpunktmäßig Lasten bis 600 kW erwartet. Die beiden Szenarien der Jahre 2050 sind zum einen durch relativ hohe Spitzenlasten gekennzeichnet, zum anderen

durch häufig auftretende Phasen von Wärmebedarfen über 500 kW. Hierfür zeichnet der erhöhte Wärmebedarf in den Sommermonaten verantwortlich.

Zur besseren Interpretation der Jahresdauerlinien sind in Tabelle 3 der Gesamt-Fernwärmebedarf sowie weitere Kennzahlen der Jahre 2015, 2030 und 2050 nach Klimaszenario gelistet.

Tabelle 3: Vergleich des Fernwärmebedarfs 2015-2030-2050 nach Klimaszenario

Szenario	2015	2030	2050
<i>„Business-as-usual“</i>			
Gesamt ¹	2.618.166	2.936.593	3.344.004
Minimum ²	36	74	99
1. Quartil ²	193	187	238
Median ²	266	266	312
3. Quartil ²	393	491	536
Maximum ²	788	820	959
<i>„Klimaschutz“</i>			
Gesamt ¹		2.628.592	3.417.893
Minimum ²		42	97
1. Quartil ²		187	232
Median ²		249	390
2. Quartil ²		415	560
Maximum ²		1.053	973

¹ Angaben in kWh; ² Angaben in kW

Auf Basis der resultierenden Lastgänge werden Untersuchungen zu Auswirkungen auf die bestehende Energieinfrastruktur ermöglicht.

4 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse zeigen – neben der generellen Zunahme der notwendigen Wärmeenergie – zwei wesentliche Änderungen in der Wärmebedarfscharakteristik, die vor allem im Szenario 2050 sehr ausgeprägt sind. Einerseits nimmt die Spitzenleistung im Szenario 2050 zu. Dies lässt sich vor allem durch die demografischen Veränderungen sowie die Zunahme des Wärmebedarfs für Industrie begründen. Dabei ist zu erwähnen, dass im zugrundeliegenden Klimaszenario auch bei steigenden jahreszeitlichen Mitteltemperaturen die kurzfristigen Minimaltemperaturen ähnlich tief sind wie im Basisszenario für 2015.

Andererseits entsteht ein deutlich erhöhter Wärmebedarf für Kühlung im Sommer. Unter der Annahme, dass sorptionsgestützte Kältelösungen zum Einsatz kommen, eröffnet sich hier ein

mögliches zukünftiges Geschäftsfeld für Wärmenetzbetreiber. Dabei könnten neben der sorptionsgestützten Kühlung weitere nachhaltige Technologien wie Photovoltaik mit Power-to-heat Lösungen, Wärmepumpen und Solarthermie zum Einsatz kommen. Im Bereich der Wärmeerzeugung könnte sich hier eine hohe saisonale Abdeckung im Sommer ergeben.

Im Falle des Versorgungsgebiets ist die Wärmeversorgung mit der bestehenden Infrastruktur bis ins Jahr 2030 gesichert, darüberhinausgehend sind jedoch Erweiterungen erforderlich. Dies betrifft sowohl die Wärmeerzeugung, als auch den Einsatz von Wärmespeichern, die nachhaltig zu einer Effizienzsteigerung und Kostensenkung im ganzen Netz beitragen und die Integration fluktuierend erzeugender erneuerbarer Ressourcen erleichtern können.

5 Referenzen

- [1] A. Goldthau, „Rethinking the governance of energy infrastructure: Scale, decentralization and polycentrism“, *Energy Research & Social Science* 1, 2014, pp. 134-140.
- [2] N. Laufer, G. Strobl, „Klima und Energie: Aus für fossile Heizungen, Klimacheck für Gesetze, vorerst kein CO₂-Preis“, URL: <https://www.derstandard.at/story/2000112854507/klima-und-energie-aus-fuer-fossile-heizungen-klimacheck-fuer-gesetze>, *Der Standard*, Vienna, 2020.
- [3] M. Mihaylov, R. Radulescu, I. Razo-Zapata, S. Jurado, L. Arco, N. Avellana, A. Nowe, „Comparing stakeholder incentives across state-of-the-art renewable support mechanisms“, *Renewable Energy* 131, 2019, pp. 689-699.
- [4] G. Steindl, C. Pfeiffer, „Comparison of Black Box Models for Load Profile Generation of District Heating Networks“, *Proceedings of 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, Dubrovnik, 04.-08.10.2017.
- [5] L.G.B. Ruiz et al., „An Application of Non-Linear Autoregressive Neural Networks to Predict Energy Consumption in Public Buildings“. *Energies* 9, 2016, p. 684.
- [6] G. Steindl. et al., „Künstliche Neuronale NARX-Modelle zur Wärmelastprognose von Nahwärmenetzen“. *Science.Research.Pannonia*. 16, 2017, pp. 161-168.
- [7] D.P. Kingma, J. Ba, „Adam: A Method for Stochastic Optimization“, *3rd International Conference for Learning Representations*, San Diego, 2015.
- [8] Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, „*Endbericht ÖKS 15 Klimaszenarien für Österreich*“, 2016.
- [9] A. Hanika et al., „*Kleinräumige Bevölkerungsprognose für Österreich 2018 bis 2040 mit einer Projektion bis 2060 und einer Modellfortbeschreibung bis 2075 (ÖROK Prognose)*“. Wien: ÖROK, 2019.
- [10] H. Toutenburg, *Lineare Modelle*, Heidelberg: Physica, 2003.
- [11] A. Spellerberg, *Neue Wohnformen - gemeinschaftlich und genossenschaftlich. Erfolgsfaktoren im Entstehungsprozess gemeinschaftlichen Wohnens*. Wiesbaden: Springer VS, 2018.
- [12] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, *Beschäftigung und Industrie 4.0*, 2017.