

IEA Fernwärme und -Kälte (DHC) Annex TS4: Digitalisierung der Fernwärme und -kälte

Arbeitsperiode 2020-2023

C. Deutsch, M. Gölles,
V. Kaisermayer, I. Leusbrock,
K. Lichtenegger, D. Muschick,
R.-R. Schmidt, E. Widl, V. Wilk

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

41/2024

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:

Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Kontakt zu „IEA Forschungskoooperation“: Mag.^a Sabine Mitter

Autorinnen und Autoren: Ralf-Roman Schmidt, Edmund Widl, Veronika Wilk, Ingo Leusbrock, Carina Deutsch, Markus Gölles, Valentin Kaisermayer, Klaus Lichtenegger, Daniel Muschick

Dieser Bericht gibt Einblick in die Ergebnisse eines Forschungsprojekts, das vom BMK gefördert wurde. Die inhaltliche Verantwortung für Vollständigkeit und Richtigkeit liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Wien, 2024

IEA Fernwärme und -Kälte (DHC)

Annex TS4: Digitalisierung der Fernwärme und -kälte

Arbeitsprogramm 2020-2023

Ralf-Roman Schmidt, Edmund Widl, Veronika Wilk
AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Ingo Leusbrock
AEE – Institut für Nachhaltige Technologien

Carina Deutsch, Markus Gölles, Valentin Kaisermayer, Klaus Lichtenegger, Daniel Muschick
BEST – Bioenergy and Sustainable Technologies

Wien, Mai 2024

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts im Rahmen der IEA Forschungskooperation. Es wurde vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) initiiert, um österreichische Forschungsbeiträge zu den Kooperationsprojekten der Internationalen Energieagentur (IEA) zu unterstützen.

Die IEA Forschungskooperationen umfassen eine breite Palette an Energiethemen mit dem Ziel Energiesysteme, Städte, Mobilitäts- und Industriesysteme fit für eine nachhaltige Zukunft bis 2050 zu machen. Auch Themen wie Gendergerechtigkeit oder Ressourcen- und Kreislaufwirtschaftsaspekte werden berücksichtigt.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements der beteiligten Forschungseinrichtungen und Unternehmen ist Österreich erfolgreich in der IEA verankert. Durch die vielen IEA-Projekte entstanden bereits wertvolle Inputs für europäische und nationale Energieinnovationen und neue internationale Standards. Auch in der Marktumsetzung konnten richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Ein wichtiges Anliegen ist es, die Projektergebnisse einer interessierten Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Daher werden alle Berichte nach dem Open Access Prinzip in der Schriftenreihe des BMK über die Plattform www.nachhaltigwirtschaften.at veröffentlicht.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Kurzfassung | 8 |
| 2 | Abstract | 9 |
| 3 | Zusammenfassung | 10 |
| 4 | Ausgangslage | 13 |
| 5 | Projekthinhalte | 15 |
| 5.1. | Hintergrund: Der IEA DHC Annex TS4 | 15 |
| 5.2. | Ziele der österreichischen Beteiligung..... | 15 |
| 5.3. | Methodik, durchgeführte Aktivitäten..... | 16 |
| 6 | Ergebnisse | 17 |
| 6.1. | Digitalisierung auf Systemebene: Einführung..... | 17 |
| 6.2. | Digitalisierung auf Systemebene, Fokus: Optimierung des Betriebes von Erzeugungsanlagen 17 | |
| 6.2.1. | Historische Perspektive und aktueller Stand der Technik..... | 18 |
| 6.2.2. | Beispiele für praktische Anwendungen..... | 21 |
| 6.3. | Digitalisierung der Infrastruktur, Fokus: Digitale Zwillinge..... | 24 |
| 6.3.1. | Was ist ein Digitaler Zwilling?..... | 24 |
| 6.3.2. | Anwendungsbereiche für Digitale Zwillinge in FWK..... | 25 |
| 6.3.3. | Beispielanwendungen | 28 |
| 6.3.4. | Arteria-Plattform | 28 |
| 6.3.5. | DigitalEnergyTestbed..... | 30 |
| 6.3.6. | Schlussfolgerungen..... | 32 |
| 6.4. | Geschäftsmodelle: Einführung..... | 33 |
| 6.5. | Geschäftsmodelle, Fokus: Reduktion der Rücklauftemperaturen im Wärmenetz..... | 33 |
| 6.5.1. | Geschäftsmodelle als Anreiz zur Temperatursenkung..... | 34 |
| 6.5.2. | Digitalisierung als Enabler | 36 |
| 6.5.3. | Niedrige Temperaturen als Schlüssel zum langfristigen Erfolg | 36 |
| 6.6. | Geschäftsmodelle, Fokus: Wärmepumpen im Stromnetz..... | 37 |
| 6.7. | Geschäftsmodelle für digitale Technologien in Fernwärmenetzen in Österreich sowie rechtliche/ regulative Randbedingungen..... | 42 |
| 6.7.1. | Übersicht | 42 |
| 6.7.2. | Inhaltliche Zusammenfassung des interaktiven Teils und der Gruppendiskussionen 43 | |
| 7 | Vernetzung und Ergebnistransfer | 47 |
| 7.1. | Webinare und Veranstaltungen des Annex TS4 | 47 |
| 7.2. | Vorträge und Präsentationen in direkten Zusammenhang mit dem Annex TS4..... | 47 |
| 7.3. | Der nationale Abschlussworkshop..... | 48 |
| 7.4. | Nutzung der Inhalte in Vorträgen, Veröffentlichungen und Vorlesungen | 49 |

| | |
|--|-----------|
| 7.5. Das internationale Guidebook | 50 |
| 8 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen | 51 |
| 8.1. Schlussfolgerungen | 51 |
| 8.2. Weiterführende Aktivitäten..... | 52 |
| 8.3. Empfehlungen für die österreichische FTI-Politik..... | 52 |

1 Kurzfassung

Hintergrund: Im Rahmen der Klima- und Energiestrategien der Österreichischen Bundesregierung wird der Digitalisierung eine Schlüsselfunktion für die Dezentralisierung, Flexibilisierung und effiziente Nutzung von Energie und Mobilität zugeschrieben. Während es im Strombereich bereits diverse Aktivitäten zur Digitalisierung gibt, befindet sich der Fernwärmesektor diesbezüglich noch am Anfang. Der derzeitige Übergang in Richtung dezentraler Wärmenetze mit sehr hohen Anteilen erneuerbarer Energien und Abwärme erfordert allerdings einen höheren Datenbedarf, Interaktionen mit den Kunden und Kundinnen sowie eine dynamische Betrachtungsweise, womit der Einsatz digitaler Analyse- und Optimierungsmethoden einen deutlichen Mehrwert bildet. Gleichzeitig müssen Herausforderungen wie damit verbundene Geschäftsmodelle, Datensicherheit und Datenschutz sowie Fragen des Dateneigentums adressiert werden.

Ziel des IEA DHC Annex TS4 ist, die Möglichkeiten der Digitalisierung für Betrieb (und Wartung) von Fernwärme-/Fernkälte (FWK)-Systemen zu identifizieren sowie die Integration digitaler Prozesse zu optimieren. Dies inkludiert die Darstellung des aktuellen Stands der Technik, die Bewusstseinsbildung für die Vorteile der Umsetzung digitaler Prozesse, die Bewertung nicht-technischer Aspekte, wie z.B. rechtliche und regulative Barrieren, die Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle sowie die Ausarbeitung von Zielen, Vorgaben und Empfehlungen. Der IEA DHC Annex TS4 ist in Subtasks bzgl. Endverbrauch, Infrastruktur (digitale Zwillinge), Systemebene, und Geschäftsprozesse aufgeteilt. Dazu wurden diverse Disseminierungsmaßnahmen durchgeführt.

Ziel der österreichischen Beteiligung am IEA DHC Annex TS4 was das Einbringen nationaler Entwicklungen und Aktivitäten in relevanten Bereichen, vor allem auf der Systemebene bzgl. Betriebsoptimierungen, Geschäftsmodelle bzgl. der Reduktion der Rücklauftemperaturen sowie der Integration von Wärmepumpen. Ein weiterer Fokus war die Leitung des Subtasks zur Digitalisierung der Infrastruktur/ digitaler Zwillinge. Weiters wurden wesentliche Schlüsselakteure Österreichs wie Lösungsanbieter und Wärmenetzbetreiber beteiligt.

Das primäre **Ergebnis** des IEA DHC Annex TS4 ist ein Handbuch, das alle wesentlichen Ergebnisse zusammenfasst und die nationalen Aktivitäten in einen internationalen Konnex setzt. Die Ergebnisse des Annexes wurden auf unterschiedliche Weise disseminiert, inkl. Vorlesungen und Social Media, Fachartikel und Vorträge auf nationalen und internationalen Veranstaltungen und die Veranstaltung eines nationalen Workshops.

2 Abstract

Background: In the context of the Austrian climate and energy strategies, digitization is attributed a key function for decentralization, flexibilization and efficient use of energy and mobility. While there are already various digitization activities in the electricity sector, digitalization in the district heating sector is still in its infancy. However, the current transition towards decentralised heating networks with very high shares of renewable energies and waste heat requires a higher data demand, an interaction with the customer and a dynamic approach, which means that the use of digital analysis and optimisation methods represents a significant added value. At the same time, challenges such as related business models, data security and data protection as well as questions of data ownership must be addressed.

The aim of the IEA DHC Annex TS4 is to identify the possibilities of digitalisation for the operation (and maintenance) of district heating and cooling systems and to optimise the integration of digital processes. This includes the presentation of the current state of the art, raising awareness of the benefits of implementing digital processes, evaluating non-technical barriers, such as legal and regulatory aspects, developing innovative business models and elaborating objectives, targets and recommendations. The IEA DHC Annex TS4 is divided into subtasks related to the End-Use, infrastructure (digital twins), system level and business processes. Further on, various dissemination activities have been done.

The aim of Austria's participation in IEA DHC Annex TS4 was to contribute national developments and activities in relevant areas, particularly at the system level with regard to optimising operation, business models for reducing return temperatures and integrating heat pumps. Another focus was the management of the subtask on the digitalisation of infrastructure/digital twins. Furthermore, important key players in Austria such as solution providers and heating network operators were involved.

The primary **result** of the Annex is a guidebook summarising the results of the subtasks and placing the national activities in an international context. Furthermore, it is planned to prepare short summaries for decision makers. The results of the Annex have been disseminated in different ways, including lectures and social media, professional articles and presentations at national and international events and the organisation of a national workshop and national summaries.

3 Zusammenfassung

Bei dem folgenden Text handelt es sich um eine Übersetzung und Anpassung der offiziellen Zusammenfassung aus dem IEA DHC Annex TS4 Guidebook. Das Guidebook kann unter <https://www.iea-dhc.org/the-research/annexes/2018-2024-annex-ts4> heruntergeladen werden.

Der Fernwärme- und Fernkältesektor, auf den in vielen Industrieländern mehr als die Hälfte des Gesamtenergieverbrauchs entfällt, steht im Zuge der aktuellen Transformation der Energiesysteme vor neuen Herausforderungen. Die erforderliche Dekarbonisierung wird zu einem komplexeren Energiesystem führen, da einige große Anlagen, die fossile Brennstoffe nutzen, durch viele kleine, über das System verteilte Produktionsanlagen ersetzt werden, die erneuerbare oder Abwärme nutzen. Viele dieser Quellen sind unbeständig; ihre Leistung wird durch das Wetter und andere Faktoren beeinflusst. Darüber hinaus müssen Fernwärme- und Fernkältesysteme effizienter und flexibler betrieben werden, um eine konsistente und kosteneffiziente Versorgung mit Wärmeenergie sowie eine wirksame Beteiligung am Ausgleichsmarkt für Stromsysteme zu gewährleisten. Aufgrund der notwendigen Veränderungen im Energiesystem wird die Fernwärme sowohl für die Endverbraucher und Endverbraucherinnen als auch für andere Energiesektoren immer vorteilhafter, und die Zahl der Anschlüsse steigt in vielen Ländern in Verbindung mit dem Ausstieg aus fossilen Brennstoffen wie Öl und Gas für die Raumheizung und die Warmwasserversorgung. In diesem veränderten Umfeld bietet die zunehmende Einführung digitaler Technologien im Fernwärme- und Fernkältesektor die Chance, die Systeme intelligenter, flexibler, effizienter und zuverlässiger zu machen und damit die notwendige Integration zusätzlicher erneuerbarer und abfallbasierter Energiequellen in die Versorgungssysteme zu beschleunigen. Dieser Wandel wirkt sich auf den gesamten Fernwärme- und Kältesektor aus. Er betrifft die gesamte Energiekette der Fernwärme, von der Erzeugung bis zur Nutzung durch den Endverbraucher oder die Endverbraucherin, und unterstützt die Transformation des gesamten Energiesystems. Die Digitalisierung von Fernwärmesystemen stellt einen Paradigmenwechsel bei der Erzeugung, Verteilung und dem Verbrauch von Wärme dar. Fortschritte in der Sensortechnologie, IoT-Konnektivität und KI-Algorithmen bieten Aussichten auf eine höhere Energieeffizienz, Systemstabilität und eine verstärkte Integration erneuerbarer Energiequellen. Für eine erfolgreiche Implementierung müssen jedoch Fragen wie der Datenschutz und die Systemintegration geklärt werden. Die Zukunft der Fernwärme liegt darin, die Digitalisierung anzunehmen und ihr Potenzial für die Schaffung nachhaltiger, intelligenter, integrierter und widerstandsfähiger Energiesysteme zu nutzen.

Der IEA DHC Annex TS4 war ein **dreijähriges internationales Forschungsprojekt**, das die Möglichkeiten der Integration digitaler Prozesse in Fernwärme- und Fernkältesysteme fördern und die Rolle der Digitalisierung für verschiedene Bereiche des Betriebs und der Wartung dieser Versorgungssysteme verdeutlichen soll. Im Rahmen des internationalen Guidebooks wird Hintergrundmaterial und aktuelles Wissen zur Digitalisierung von Fernwärmesystemen geliefert. Die Zielgruppen sind Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger in Versorgungsunternehmen, Fernwärmebetreibern, Systemlieferanten, sowie der Wissenschaft. Es wurde aufgezeigt, wie digitale Technologien das gesamte Energiesystem verbessern und die Effizienz steigern kann. Digitale Anwendungen werden den Betreiberinnen und Betreibern von Fernwärmesystemen dabei helfen, ihre Anlagen und ihren Netzbetrieb vollständig zu optimieren und in Zukunft am gesamten

Energiemarkt teilzunehmen, während sie gleichzeitig den Endverbraucher oder die Endverbraucherin unterstützen.

Gebäude und die Art und Weise, wie **Endverbraucher und Endverbraucherinnen** thermische Energie nutzen, bieten einen Rahmen für potenzielle Verbesserungen, wie etwa die Senkung der Systemtemperatur in Fernwärmesystemen. Die Optimierung der Nachfrageseite wird als ein kritischer Teil des Projekts angesehen, da der Betrieb des Endverbrauchers oder der Endverbraucherin der Optimierung des Versorgungssystems Grenzen setzt. Darüber hinaus hat die jüngste Umsetzung neuer Vorschriften, die die Digitalisierung der Nachfrageseite fördern, neue Möglichkeiten für die Überwachung und das Management von Wärme- und Kältesystemen in Gebäuden eröffnet und den Weg für eine nachhaltige Transformation der Fernwärmebranche geebnet. Der aktuelle Stand der Digitalisierung im Gebäudebereich wird anhand von Fallbeispielen bewertet und dokumentiert. Darüber hinaus werden Erfahrungen aufgezeigt, wie niedrige Temperaturen, ein verbesserter Betrieb und eine Fehlererkennung in Übergabestationen und Wärmeverteilungssystemen erreicht werden können.

Die Untersuchung der Rolle, die die Digitalisierung im Fernwärme- und Fernkältesystem **als Ganzes sowie im übrigen Energiesystem** spielen kann, bietet mehrere wichtige Erkenntnisse. Auf der Systemebene kann die Digitalisierung in zwei Kategorien unterteilt werden.

- Betriebsoptimierung, d.h. die digitalen Assets greifen direkt in die Netz- oder Komponentensteuerung ein. Im Gegensatz zu den regelbasierten Regelkreisen, die üblicherweise zur Steuerung von Netzkomponenten verwendet werden, können digitale Werkzeuge zur Optimierung des Systembetriebs eingesetzt werden.
- Analytische Optimierungsstrategien, die zusätzlich zur Betriebsoptimierung erforscht werden. Analytik bezieht sich auf die Analyse von (großen Mengen an) Messdaten, um den ausfallsicheren und optimalen Betrieb des Netzes zu gewährleisten. Digitale Analysetools liefern Informationen über das Systemverhalten, oft im Offline-Modus. Auf der Grundlage dieser Daten können Maßnahmen zur Verbesserung des Verhaltens ergriffen werden.

Die Analysen geben einen genauen Überblick darüber, wie die Digitalisierung in den verschiedenen Elementen eines Fernwärme- und Fernkältesystems derzeit umgesetzt wird. Wobei zu bemerken ist, dass der Implementierungsgrad digitaler Technologien nicht einheitlich ist.

Insbesondere das Konzept der **Digitalen Zwillinge** („Digital Twins“) ermöglicht die Entwicklung digitaler Dienste, die die Betreiberinnen und Betreiber von Fernwärme- und Fernkälte-Infrastrukturen in ihrem täglichen Betrieb unterstützen. Im Ergebnis werden konkrete Anwendungsbereiche für Digital Twins im Fernwärme-/Fernkälte-Betrieb und in der Wartung aufgezeigt. Eine Auswahl von Best-Practice-Beispielen für den Einsatz von Digital Twins für den Einsatz digitaler Technologien in der FWK-Infrastruktur zeigt zudem den praktischen Nutzen dieser Strategie.

Die Digitalisierung von Fernwärmenetzen erfordert nicht nur die technologische Implementierung in bestehende Infrastrukturen, sondern auch ein Überdenken der derzeitigen Betriebsstrategien. Gleichzeitig müssen **Prozesse zur Monetarisierung** der innovativen Technologie angestoßen werden. Anschließend wird erläutert, wie die Digitalisierung zur Schaffung neuer und innovativer wirtschaftlicher Möglichkeiten beim Betrieb heutiger Fernwärmenetze führen kann. Darüber hinaus werden repräsentative Geschäftsmodelle für die verschiedenen Stufen der Fernwärmeerzeugung, -

verteilung und -nutzung sowie ein Ausblick auf Geschäftsmodelle anderer digitalisierter Branchen und Märkte gegeben.

Wie im Bericht dargestellt, wird die Datenverarbeitung in der Fernwärmeversorgung eine immer größere Rolle spielen. Dies erfordert jedoch eine stärkere Auseinandersetzung mit den **rechtlichen Anforderungen und Verpflichtungen** in Bezug auf Datenschutz und Datensicherheit. Die rechtlichen Anforderungen sind komplex und unterscheiden sich in den verschiedenen Ländern und Regionen der Welt.

Das in diesem Leitfaden gesammelte Material zeigt, dass die Digitalisierung eine wesentliche Grundlagentechnologie ist, um die Flexibilität und Effizienz von Fernwärme- und Fernkältesystemen zu erhöhen und die breitere Integration von erneuerbaren Energien und Abwärme zur Dekarbonisierung unserer Energieversorgung zu erleichtern. Es sind jedoch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich, um die praktische und weit verbreitete Anwendung der digitalen Technologie in verschiedenen Situationen und Umgebungen zu bewerten. Dabei ist es wichtig, diverse Hindernisse zu überwinden und die Diskussion zu Digitalisierungslösungen in Fernwärme- und Fernkältesystemen weiter voranzutreiben.

Die Digitalisierung von Fernwärme- und Fernkältesystemen ist eine wesentliche Technologie für die Dekarbonisierung des thermischen Energiesystems, und angesichts der zunehmenden Komplexität oder der Nachfrage nach Systemflexibilität und einer grünen/erneuerbaren Wärmeversorgung ist sie einfach unerlässlich!

Der **Beitrag Österreichs im IEA DHC Annex TS4** konzentrierte sich auf folgende Aspekte:

- Digitalisierung auf Systemebene, Fokus: Optimierung des Betriebes von Erzeugungsanlagen inkl. der Analyse der historischen Perspektive und des aktuellen Stands der Technik sowie Beispiele für praktische Anwendungen
- Digitalisierung der Infrastruktur, Fokus: Digitale Zwillinge, inkl. einer Definition: Was ist ein Digitaler Zwilling? Der Darstellung der Anwendungsbereiche für Digitale Zwillinge in FWK-Netzen sowie Beispielanwendungen aus Österreich, wie die Arteria-Plattform und das DigitalEnergyTestbed
- Geschäftsmodelle, Fokus: Reduktion der Rücklauftemperaturen im Wärmenetz, inkl. der Diskussion von Geschäftsmodellen als Anreiz zur Temperatursenkung und der Analyse von Digitalisierungsmaßnahmen als "Enabler" sowie der Darstellung niedriger Temperaturen als Schlüssel zum langfristigen Erfolg
- Geschäftsmodelle, Fokus: Wärmepumpen im Stromnetz, inkl. einer Analyse der unterschiedlichen Anwendungsfälle und der sich daraus ergebenden Geschäftsmodelle.
- Die Analyse von Geschäftsmodellen für digitale Technologien in Fernwärmenetzen in Österreich sowie rechtliche/ regulative Randbedingungen im Rahmen eines nationalen Stakeholder-Workshops.

4 Ausgangslage

Österreich bekennt sich im Rahmen der Klima- und Energiestrategie Mission2030¹ sowie des Integrierten nationalen Energie- und Klimaplan (Entwurf)² zu den internationalen Klimazielen. Die Digitalisierung wird hierbei als eine Schlüsselfunktion für die Dezentralisierung, Flexibilisierung und effiziente Nutzung von Energie und Mobilität genannt. Dieses betrifft neben der Steuerung und Regelung von integrierten Energiesystemen auch neue, zukunftsfähige Geschäftsmodelle. Langfristig wird die Verknüpfung der Sektoren Strom, Wärme und Mobilität ins Zentrum der IKT-gestützten Optimierung des Energie- und Mobilitätssystems rücken.

Während es im Stromnetzbereich bereits diverse Aktivitäten zur Digitalisierung in Österreich und international gibt, steht der Fernwärmesektor bzgl. Digitalisierung noch recht am Anfang. Derzeit findet allerdings ein Übergang in Richtung dezentraler Wärmenetze mit sehr hohen Anteilen erneuerbarer Energien und Abwärme statt, bzw. die Nutzung „neutraler“ Temperaturen mit Verbraucherseitigen Wärmepumpen, die 4te bzw. 5te Generation (siehe Abbildung 1).

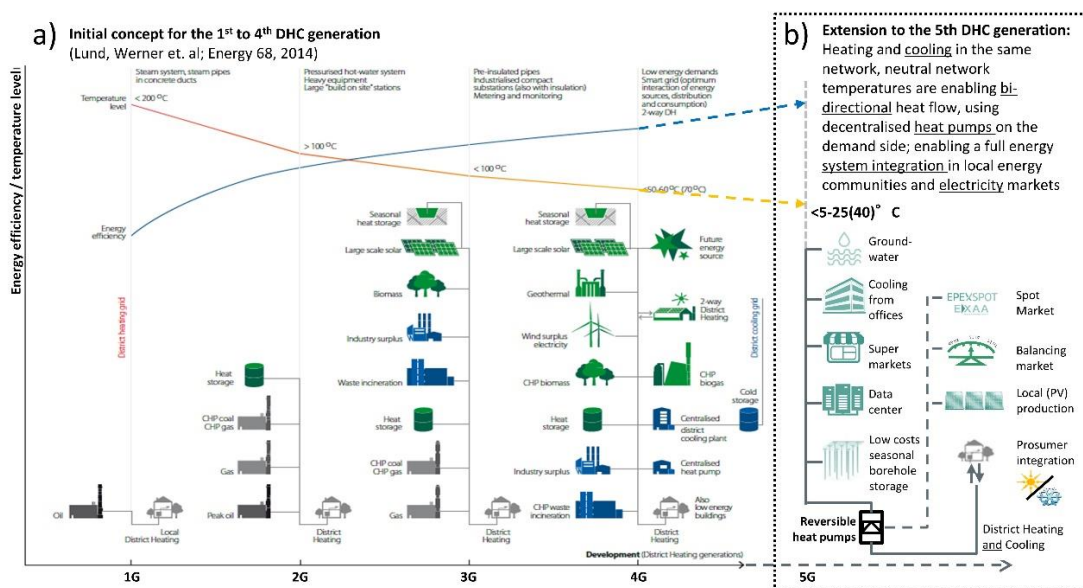


Abbildung 1: a) Konzept der 1., 2., 3. und 4. Generation der Wärmenetze nach Lund, Werner et al; b) Erweiterung des Konzepts auf die 5. Generation (AIT eigene Darstellung)

Derartige Netze sind geprägt von wesentlich niedrigeren Temperaturniveaus, einer dynamischen Betriebsweise sowie der Einbindung von Flexibilitätsoptionen. Entsprechend ist der Datenbedarf wesentlich höher, und es erfordert eine dynamische Betrachtungsweise, variabler Temperaturniveaus und die Berücksichtigung bidirektionaler Strukturen.

Digitale Analyse- und Optimierungsmethoden ermöglichen es, das Energiesystem intelligenter, effizienter und zuverlässiger zu machen und die Effizienz sowie die Integration erneuerbaren Energien zu steigern. So können es in Zukunft digitale Anwendungen FWK-Systemen ermöglichen,

¹ <https://infothek.bmk.gv.at/klimastrategie-mission2030-praesentiert/>

² https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/klimaschutz/nat_klimapolitik/energie_klimaplan.html

den dezentralen Netzbetrieb zu optimieren und gleichzeitig den Endverbraucher oder die Endverbraucherin zu involvieren. Andererseits müssen neue Herausforderungen angegangen werden, wie z.B. Geschäftsmodelle, Datensicherheit und Datenschutz sowie Fragen des Dateneigentums.

Die *Digital Roadmap for DHC* der Europäischen Technologieplattform³ diskutiert Digitalisierungspotentiale und Beispiel in den Bereichen Erzeugung, Verteilung, Gebäude, Verbrauch, sowie Planungsprozesse, Asset Management und die Sektorkopplung. Weiters werden horizontale Themen wie Blockchain, künstliche Intelligenz und Big Data identifiziert. Die *Orientierungshilfe zur Digitalisierung in der Fernwärmebranche* des AGFW⁴ zeigt außerdem Beispiele in den Bereichen Cloud Computing, Predictive Analytics, Deep Learning, Virtual und Augmented Reality sowie Digitale Zwillinge. Kommerzielle Plattformen zu Betriebsoptimierung von Wärmenetzen existieren derzeit allerdings nur wenige, wie z.B. Utilifeed⁵, NODA5⁶ oder ectocloud⁷.

³ <https://www.euroheat.org/publications/digital-roadmap-district-heating-cooling/>

⁴ <https://www.agfw.de/digitalisierung/>

⁵ <https://noda.se/>

⁶ <https://www.utilifeed.com>

⁷ <http://ectogrid.com/>

5 Projektinhalt

5.1. Hintergrund: Der IEA DHC Annex TS4

Das IEA Technology Cooperation Programme on District Heating and Cooling (IEA DHC) ist darauf ausgerichtet, die Fernwärmeversorgung und die Kraft-Wärme-Kopplung zu leistungsfähigen Instrumenten zur Energieeinsparung und zur Verringerung der Umweltauswirkungen der Wärmeversorgung zu machen. Die Aktivitäten, die unter der Aufsicht der IEA DHC stehen, werden als Annexe bezeichnet.

Ziel des IEA DHC Annex TS4 ist es, die Möglichkeiten der Digitalisierung von Fernwärme- und Fernkälte-Systemen zu identifizieren sowie die Integration digitaler Prozesse zu optimieren. Dazu bildet der Annex TS4 eine Plattform für Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Industrie zur Stärkung der internationalen Forschungszusammenarbeit und zur Vernetzung von Wissen aus den jeweiligen nationalen Forschungsaktivitäten.

Der IEA DHC Annex TS4 lief von November 2020 bis Dezember 2023, inklusive der Berichts- und Reviewing-Phase. Während des Projekts wurden mehrere Workshops, Webinare und "Special Sessions" auf unterschiedlichen Konferenzen organisiert. Die Aktivitäten im IEA DHC Annex TS4 wurden durch einen Task-Sharing-Ansatz finanziert, bei dem verschiedene internationale Teilnehmer und Teilnehmerinnen Ressourcen in Form von in-kind-Leistungen beisteuerten. Die Beteiligung der Partner aus Österreich wurde aus Mitteln des BMK gefördert. Der Task-Sharing-Ansatz ermöglichte es, bestehende nationale und internationale Projekte über die internationale Plattform zu verbinden und so von internationalen Erfahrungen und dem Austausch zu profitieren.

Der IEA DHC Annex TS4 war in folgende Subtasks gegliedert:

- Subtask A: Digitalisierung des Endverbrauchs
- Subtask B: Digitalisierung der Infrastruktur (digitaler Zwilling)
- Subtask C: Digitalisierung auf Systemebene
- Subtask D: Digitalisierung von Geschäftsprozessen
- Subtask E: Disseminierungsmaßnahmen

Teilnehmende Staaten waren Belgien, Dänemark, Deutschland (Leitung), Frankreich, Norwegen, Österreich, Südkorea, Schweden, Vereinigtes Königreich.

5.2. Ziele der österreichischen Beteiligung

Das Ziel der österreichischen Beteiligung war die Leitung des Subtask B und die Beteiligung an den anderen Subtasks mit einem nationalen Konsortium, das alle wesentlichen nationalen Aktivitäten in diesem Bereich vereint und somit Österreich international angemessen positionieren kann. Das nationale Konsortium bestand aus

- AIT Austrian Institute of Technology GmbH
- AEE - Institut für Nachhaltige Technologien
- BEST- Bioenergy and Sustainable Technologies

Im Rahmen des IEA DHC Annex TS4 wurden diverse Events durchgeführt, insbesondere Working Phase Meeting, Webinare, Special Sessions in internationalen Konferenzen usw., wobei auf eine starke Beteiligung des österreichischen Konsortiums geachtet wurde. Dieses inkludiert auch einen nationalen Abschluss-Workshop – siehe Abschnitt 0.

5.3. Methodik, durchgeführte Aktivitäten

Im Vordergrund des IEA DHC Annex TS4 standen der Wissenstransfer und die internationale Zusammenarbeit innerhalb des Annexes. Zusätzlich wurden Daten aus unterschiedlichen Quellen gesammelt (Literaturrecherchen, Interviews mit Anlagenbetreibern, sowie Fragebögen und Interviews mit Expertinnen und Experten) und Workshops mit nationalen Stakeholdern durchgeführt. Als wesentliches Ergebnis des Annexes liegt das internationale **Guidebook** vor, in dem das nationale Konsortium maßgebend beigetragen hat. Das Guidebook kann unter <https://www.iea-dhc.org/the-research/annexes/2018-2024-annex-ts4> heruntergeladen werden.

6 Ergebnisse

Dieser Abschnitt fasst die Ergebnisse der nationalen Beteiligung am IEA DHC Annex TS4 zusammen, mit einem Fokus auf

- Digitalisierung auf Systemebene
- Digitalisierung der Infrastruktur
- Geschäftsmodelle

6.1. Digitalisierung auf Systemebene: Einführung

Die Digitalisierung auf Systemebene wird im Rahmen des IEA DHC Annex TS4 in zwei Bereiche unterteilt:

- Betriebs-Optimierung, in der digitale Assets direkt in die Steuerung des Netzes oder seiner Komponenten eingreifen. Die betriebliche Optimierung erfolgt online und automatisiert. Im Vergleich zu einfachen Regelkreisen, die typischerweise zur Steuerung der Netzkomponenten eingesetzt werden, können digitale Werkzeuge zur Optimierung des Systembetriebs eingesetzt werden. Regelbasierte Regler sind in den meisten Fällen als einzelne, isolierte Systeme konzipiert, die das Gesamtsystem nicht berücksichtigen, und daher ist die Leistung des Systems oft suboptimal.
- Analytische Optimierungsmethoden: Hierunter versteht man die Auswertung von (vielen) Messdaten, um einen ausfallsicheren und optimalen Betrieb des Netzes zu gewährleisten. Digitale Analysewerkzeuge liefern Informationen über das Systemverhalten, oftmals offline. Auf der Grundlage dieser Informationen können Maßnahmen zur Verbesserung des Verhaltens getroffen werden.

Der folgende Abschnitt ist ein Extrakt aus dem internationalen Guidebook, er fasst die wesentlichen Ergebnisse der Österreichischen Beteiligung am IEA DHC Annex TS4 zusammen, wobei der Fokus auf der Optimierung des Betriebes von Erzeugungsanlagen lag.

6.2. Digitalisierung auf Systemebene, Fokus: Optimierung des Betriebes von Erzeugungsanlagen

Dieser Beitrag wurde koordiniert und verfasst von: Carina Deutsch, Markus Gölls, Valentin Kaisermayer, Klaus Lichtenegger und Daniel Muschick, BEST

Die Regelung der Wärmeerzeugung in Wärmenetzen (hier: District Heating, DH) ist schon per se eine anspruchsvolle Aufgabe. In der Vergangenheit wurde sie mit einfachen Reglern (z.B. PID-Reglern) und logische Regeln bewältigt. Bei kleineren Netzen wird dies auch heute noch so gehandhabt. Mit solchen isolierten Reglern ist es jedoch schwierig, bei größeren Systemen eine effiziente Regelung zu erreichen. Mit einer besseren IKT-Infrastruktur (Informations- und Kommunikationstechnologie) werden optimierungsbasierte Regelungskonzepte auf übergeordneter Ebene immer attraktiver. Im

Folgendes wird ein Überblick über die optimierungsbasierte Regelung für die Produktion in DH-Netzen gegeben.

6.2.1. Historische Perspektive und aktueller Stand der Technik

Der Stand der Technik bei der Regelung kleiner und mittlerer Fernwärmeerzeugungsanlagen beruht immer noch hauptsächlich auf einfachen regelbasierten Konzepten. Diese berücksichtigen meist nur aktuelle Messungen und versuchen, den Inhalt der thermischen Energiespeicher (Thermal Energy Storages, TES) innerhalb bestimmter Grenzen zu halten, während sie die Vorlauftemperatur des Netzes in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur verändern. Die meisten Regelungskonzepte berücksichtigen nur aktuelle Messungen, teilweise werden aber auch Prognosen des Wärmebedarfs oder des erwarteten Ertrags einer solarthermischen Anlage einbezogen, siehe z.B. (Gölles et al., 2021).

Während diese Regelungskonzepte für einfache kleine bis mittelgroße DH-Netze gut funktionieren, haben sie Schwierigkeiten bei komplizierteren Systemkonfigurationen wie z.B. mehreren Einspeisepunkten oder Speichern im gesamten Netz, einer Zunahme von nicht steuerbaren intermittierenden erneuerbaren Energiequellen wie Abwärme oder solarthermischen Anlagen und bei Sektorenkopplung, d.h. insbesondere der Integration von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK-Anlagen) und Wärmepumpen mit variierenden Strompreisen. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, ist ein übergeordneter Regelungsansatz erforderlich, der die Produktionseinheiten und TES im gesamten System koordiniert. Diese übergeordnete Regelung erfolgt momentan noch meist durch erfahrene menschliche Bedienerinnen und Bediener.

Um die Betriebskosten und Emissionen solcher DH-Netze zu senken, ist jedoch ein automatisierter Ansatz erforderlich, der alle verfügbaren Ressourcen und betrieblichen Rahmenbedingungen berücksichtigt. Ein sehr vielversprechender Ansatz für diese zukünftigen Herausforderungen sind prädiktive, optimierungsbasierte Regelungskonzepte. Optimierungsbasierte Regelungsansätze, die oft auch als optimierungsbasierte Energiemanagementsysteme (EMS) bezeichnet werden, lösen ein Optimierungsproblem in Echtzeit und liefern optimale Zeitpläne für alle Produktionseinheiten für einen bestimmten Planungshorizont. Wenn neue Informationen, z. B. Messungen und aktualisierte Bedarfs- und Ertragsprognosen, eintreffen, wird das Optimierungsproblem erneut gelöst. Daher kann dieser Ansatz mit Störungen und Ungewissheiten umgehen.

Das Optimierungsproblem besteht aus einer Zielfunktion, die es zu minimieren gilt, und aus Nebenbedingungen, die eine physikalisch sinnvolle Lösung, d. h. eine Betriebsstrategie der Produktionsanlagen, gewährleisten. Die Zielfunktion erfasst ökonomische Aspekte wie Brennstoffkosten und Betriebskosten, bestraft aber auch unerwünschtes Verhalten wie z.B. häufiges Ein- und Ausschalten von Biomasse-Kesseln (was mit erhöhten Emissionen einher geht). CO₂-Emissionen können ebenfalls berücksichtigt werden, indem ihnen ein spezifischer Preis zugewiesen wird, wodurch sie in einer wirtschaftlichen Optimierung berücksichtigt werden.

Darüber hinaus können (fiktive) Strafkosten für den Betrieb eines Speichers zu nahe an seinen Grenzen riskante Betriebsstrategien vermeiden, womit sie zu einem konservativeren Betrieb führen. Strafen für Last- oder Ertragsabwürfe, d. h. für die nicht vollständige Befriedigung der Nachfrage der Kunden und Kundinnen oder für Energieverschwendung, können eingeführt werden, um eine etwaige Unlösbarkeit des Optimierungsproblems zu vermeiden, z. B. wenn eine sehr große,

unerwartete Nachfrage nicht befriedigt werden kann. Die Kostenfunktion gewichtet also die verschiedenen Aspekte, die bei der Bewertung des Betriebsverhaltens zu berücksichtigen sind. Die Optimierungsrandbedingungen modellieren das Energiesystem und seine Betriebsgrenzen. Dazu gehören das dynamische Verhalten der TES, die Garantie, dass der gesamte Bedarf gedeckt wird, und die maximalen Rampenraten von Erzeugern wie Biomassekesseln. Darüber hinaus stellen sie auch sicher, dass hydraulische Beschränkungen im Verteilungssystem, wie z. B. maximale Massenströme durch Leitungen, nicht verletzt werden.

All diese Forderungen können entweder als harte Beschränkungen (*hard constraints*) oder als sogenannte weiche Beschränkungen (*soft constraints*) formuliert werden, d. h. es werden ihrer Verletzung Kosten zugeordnet. Um ein schnelles Ein- und Ausschalten eines Erzeugers zu vermeiden, könnte man zum Beispiel entweder eine Mindest-Ein- oder Ausschaltzeit festlegen oder jedem Ein- und Ausschalten des Erzeugers einen Preis zuordnen, siehe z. B. (Carrion & Arroyo, 2006). Während Ersteres zu Unlösbarkeiten führen kann, wenn eine unerwartete Nachfrage befriedigt werden muss und der Erzeuger noch nicht einschalten kann, ist Letzteres schwer abzustimmen, da der zugewiesene Preis mit allen anderen Kosten im System in Einklang gebracht werden muss.

Die Komplexität und Klasse des resultierenden Optimierungsproblems hängt vom Modell ab. Wenn nichtlineare Modelle verwendet werden, ist das resultierende Optimierungsproblem ebenfalls nichtlinear, was sehr schwer in Echtzeit zu lösen ist. Typischerweise werden lineare Modelle mit ganzzahligen Variablen verwendet, was zu einem zu lösenden gemischt-ganzzahligen linearen Programm (MILP) führt, siehe z. B. (Morales-Espana et al., 2013). Für diese gibt es sehr gute kommerzielle und Open-Source-Löser, wie (Gurobi Optimisation, o. J.) oder (IBM, 2019).

Bestimmte Nichtlinearitäten, z.B. zur Modellierung von Effizienzkurven, können durch stückweise affine (PWA) Funktionen approximiert werden, siehe z.B. (Bemporad & Morari, 1999). Das Thema optimierungsbasierte Regelung ist ein laufendes Forschungsgebiet. Die Forschungsthemen lassen sich hauptsächlich in die Regelung der Erzeugung (EMS), der Wärmeverteilung und des Verbrauchs (Demand Side Management, DSM) unterteilen. Wird nur die Erzeugungsseite betrachtet, so wird dies häufig auch als Unit-Commitment-Problem bezeichnet, siehe z.B. (Carrion & Arroyo, 2006).

Aufgrund der besseren Echtzeitleistung von MILP-Lösern wird versucht, die inhärenten Nichtlinearitäten thermischer Systeme zu approximieren, z. B. durch Annäherung eines Massenstroms mit variierender Temperatur durch eine Mischung mehrerer Massenströme bei konstanter Temperatur, siehe z. B. (Moretti et al., 2021) oder (Muschick et al., 2022). Es werden jedoch auch nichtlineare Modelle verwendet, wie z. B. (Jansen et al., 2023). Da zusätzliche Gewinne erzielt werden können, wenn die Optimierung auf der Vertriebsseite berücksichtigt wird, können auch andere Ansätze zur Kopplung von Produktion und Vertrieb in Betracht gezogen werden. Allen diesen Ansätzen ist gemeinsam, dass ein Optimierungsproblem auf der Grundlage von Spezifikationen des betrachteten Netzes oder Energiesystems formuliert werden muss. Der Konfigurationsprozess ist oft auf ein bestimmtes Energiesystem zugeschnitten und erfordert Expert:innenwissen, um Änderungen vorzunehmen. Für eine breite praktische Anwendung von optimierungsbasierten Regelungsansätzen müssen daher sehr modulare Frameworks entwickelt werden, die eine effiziente, hochgradig automatisierte Formulierung des Optimierungsrahmens und damit eine effiziente Implementierung und Bedienung, ermöglichen.

Es gibt kommerziell erhältliche EMS-Produkte für DHC-Netze, z. B. (INNIO Jenbacher, o. J.), (Gradyent, o. J.), (Decision Trees GmbH, o. J.), (Fraunhofer IEE, o. J.), (STORM controller, o. J.),

(Danfoss A/S, o. J.), (EMD International A/S, o. J.), von denen einige auch auf MILP beruhen. Ein auf stochastischer Optimierung basierendes EMS wird von Decision Trees entwickelt. Danfoss und Gradyent bieten komplette Softwarepakete mit Werkzeugen zur Produktionsoptimierung und Netzsimulation an.

Diese Softwaretools für das Energiemanagement haben jedoch eine vergleichsweise geringe Marktdurchdringung, was zum einen auf die traditionell konservative Sichtweise der Betreiber:innen von DH-Netzen zurückzuführen ist, die sich stark auf die Versorgungssicherheit ihrer Kunden und Kundinnen konzentrieren müssen, und zum anderen auf die Heterogenität der installierten Kessel, Protokolle und der vorhandenen Automatisierungssoftware. Dies führt zu einem nicht zu vernachlässigenden Personalaufwand für jedes automatisierte Netz und behindert somit eine schnelle Verbreitung auf dem Markt, obwohl die Einsparungen bei den Brennstoffkosten und die Reduzierung der CO₂-Emissionen beträchtlich sein können.

So wird beispielsweise in (Danfoss A/S, o. J.) von durchschnittlichen Kraftstoffkosteneinsparungen von 1-3 % und in (Kaisermeyer et al., 2022) von 7 % Kraftstoffkosteneinsparungen und einer Verringerung der CO₂-Emissionen um 35 % für miteinander verbundene DH-Netze berichtet. Dabei wird die Vereinheitlichung von Protokollen und Schnittstellen eine wichtige Voraussetzung für solche intelligenten Regelungssysteme sein. Ein auf prädiktiver Optimierung basierendes EMS ist vor allem dann von Vorteil, wenn das Energiesystem vielfältig ist, d. h. mehrere unterschiedliche Erzeugungstechnologien aufweist, fluktuierende erneuerbare Energiequellen einbezieht und Flexibilität, z. B. in Form großer Speicherkapazitäten, vorhanden ist. Laut (Aschbacher, 2013) sind die anfänglichen Investitionskosten für ein optimierungsbasiertes EMS für kleinere Wärmenetze zu hoch. Daher verlassen sich kleinere KWK-Anlagen, z. B. mit zwei Heizkesseln und einer TES, oft noch auf Standardregelungsschemata und eine Art Merit-Order.

Ändert sich jedoch die Konfiguration, d. h. wird eine neue Produktionseinheit, wie z. B. eine Wärmepumpe mit PV und variablen Energietarifen, installiert, kann es schwierig sein, das Regelungsschema anzupassen, um die Anlage effizient zu betreiben. Wird ein optimierungsbasiertes EMS eingesetzt, muss nur die Konfiguration angepasst werden, und die neuen optimalen Zeitpläne werden das neue System automatisch so kosteneffizient wie möglich betreiben. Die Vereinheitlichung der Schnittstellen und die Digitalisierung der bestehenden DH-Netzinfrastruktur ist ein Eckpfeiler solcher intelligenten Regelungskonzepte. Daher muss nicht nur die Forschung und Entwicklung an den eigentlichen Rahmenbedingungen für eine auf prädiktiver Optimierung basierende Regelung, sondern auch die Standardisierung von Schnittstellen und generell die Digitalisierung der DH-Netze fortgesetzt werden.

6.2.2. Beispiele für praktische Anwendungen

Im Folgenden werden Beispiele für drei unterschiedliche Anwendungen erläutert:

- Anwendung 1: Exemplarischer Ansatz zur optimierungsbasierten Regelung
- Anwendung 2: Optimierung der Wärmeerzeugung in Multi-Erzeuger-Fernwärmesystemen
- Anwendung 3: End-to-End-Regelung spart Energie und ermöglicht eine bessere Nutzung grüner Energiequellen zu geringeren Kosten

Anwendung 1: Exemplarischer Ansatz zur optimierungsbasierten Regelung

In Moser et al. (2020) wird ein modulares EMS-Framework vorgeschlagen, das das Ziel einer effizienten und hochgradig automatisierten Formulierung der Regelung verfolgt, indem es standardisierte Bausteine bereitstellt, die leicht zusammengesetzt und verbunden werden können, um eine breite Palette möglicher Systeme darzustellen. Die Kernidee hinter diesem MILP-basierten EMS-Framework, das vom österreichischen COMET-Zentrum *BEST – Bioenergy and Sustainable Technologies* entwickelt wurde, ist die Modellierung einer Vielzahl von Multi-Energie-Systemen, d.h. Systemen in denen mehrere Energiesektoren ineinandergreifen. Das wird durch einen komponentenbasierten Ansatz erreicht, bei dem jede Produktionseinheit, jeder Verbraucher, jede Verbraucherin, jeder Wärmebedarf, jedes TES oder jede Batterie eine einzelne Komponente darstellt. Die Verbindungen zwischen den Komponenten sorgen für die Massen- und Energiebilanz. Das Optimierungsproblem wird dann automatisch aus dieser komponentenbasierten Beschreibung des Energiesystems abgeleitet.

In Abbildung 2 wird eine solche beispielhafte Konfiguration einer Heizungsanlage eines Fernwärmenetzes gezeigt, mit einem Blockheizkraftwerk (BHKW), einem Gaskessel, einer Wärmepumpe und mehreren Pufferspeichern als TES. Durch BHKW und Wärmepumpe ist der thermische Sektor auch an den elektrischen gekoppelt, wo es zusätzliche Erzeuger (wie Photovoltaik, PV) und Speichermöglichkeiten (Batteriespeicher) gibt. Jeder Block führt Standardaktionen durch (z.B. Ertragsvorhersage für PV-Anlagen und thermische Solarkollektoren, Zustandsschätzung auf der Grundlage von Temperatursensoren in der TES, Nachfrage-Regelung innerhalb des Netzes) und liefert somit die erforderlichen Informationen für den Löser des Optimierungsproblems.

Da Vorhersagen nie perfekt sind, wird ihre Qualität kontinuierlich bewertet und die Unsicherheit in einer stochastischen Optimierungsproblemformulierung berücksichtigt. Dieser EMS-Rahmen wurde in der Praxis für zusammenschaltete Fernwärmenetze (Kaisermayer et al., 2022), Industrieanlagen, Stadtviertel (Moser et al., 2022) und Einfamilienhäuser getestet. Die letztendlich erzielbaren Einsparungen hängen stark von der Ausgangssituation und vom gewählten Fokus der Kostenfunktion, d.h. ökonomisches vs. ökologisches Optimum, ab. Die typischerweise erreichbare Verbesserung liegt im Bereich von 5-10 %, z.B. 9 % in (Moser et al., 2022).

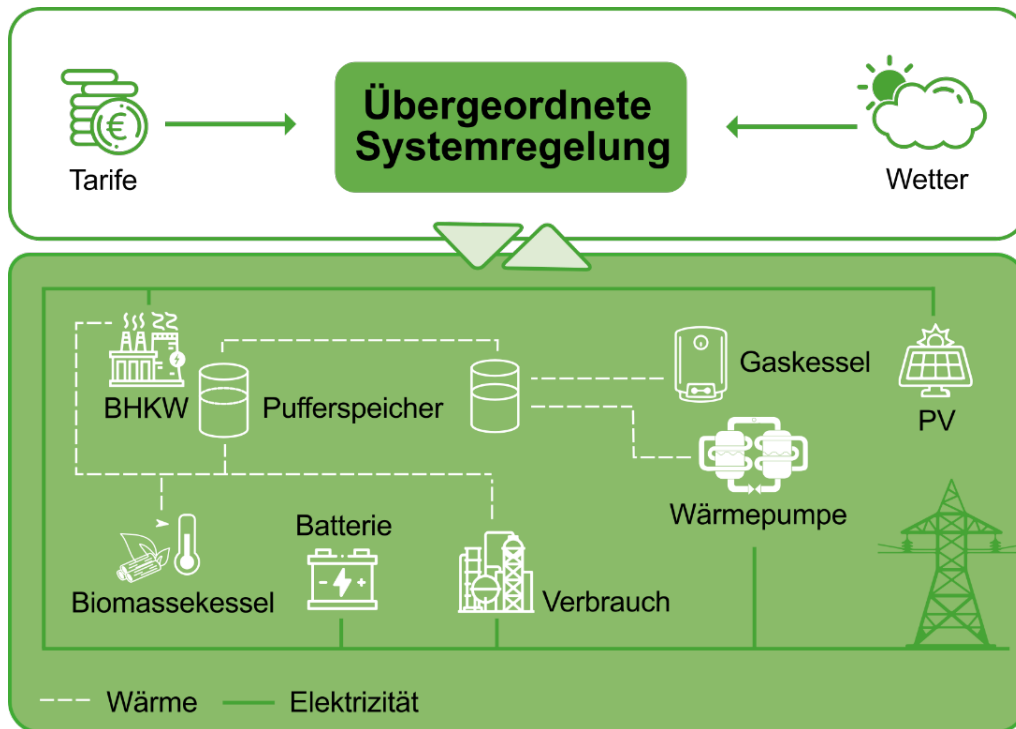


Abbildung 2: Beispielhafte Konfiguration der Heizanlage eines einfachen Fernwärmenetzes unter Berücksichtigung der Sektorenkopplung durch BHKW und Wärmepumpe. © BEST – Bioenergy and Sustainable Technologies.

Anwendung 2: Optimierung der Wärmeerzeugung in Multi-Erzeuger-Fernwärmesystemen

Danfoss Leanheat Production ist eine fortschrittliche Software für die Vorhersage, Planung und Optimierung der Fernwärmeerzeugung und -verteilung. Der Eckpfeiler von Leanheat Production ist eine sechstägige KI-basierte Bedarfsprognose. Die Software berechnet den kostenoptimalen Produktionsmix aus den verfügbaren Wärmequellen auf der Grundlage der Schätzungen und der Energie-Spotpreise. Zusätzlich schätzt Leanheat Production die optimale Versorgungstemperatur mit Hilfe eines datengesteuerten numerischen Modells. Die Kombination aus effektiver Lastprognose, Produktionsoptimierung in Verbindung mit der Optimierung der Vorlauftemperatur führt zu einer Verringerung der Wärmeverluste im Verteilungsnetz, einer besseren Auslastung der Produktionsanlagen und einer Senkung der Kosten für die Wärmeerzeugung. Die Lösung besteht aus drei Bausteinen:

1. Lastprognose – ermöglicht eine effektive und genaue Planung des Betriebs.
2. Produktionsoptimierung – ermöglicht den Betrieb der effizientesten Wärmeanlage jedem Zeitpunkt. Die Einsparungen liegen zwischen 1-3 % der Brennstoffkosten.
3. Temperaturoptimierung – datengesteuerte Minimierung der Vorlauftemperatur zur Steigerung der Effizienz der Wärmeverteilung. Die Einsparungen liegen zwischen 5-10 % der Verteilungsverluste.

Anwendung 3: End-to-End-Regelung spart Energie und ermöglicht eine bessere Nutzung grüner Energiequellen zu geringeren Kosten

Vatajankoski ist ein innovatives Energieunternehmen in Kankaanpää, Finnland, das ursprünglich auf lokaler Wasserkraft basierte. Neben einer Bio-KWK-Anlage und Gas- und Öl-Spitzenlastkesseln hat Vatajankoski in eine neue Abwärmenutzungsanlage und einen großen Wärmespeicher investiert. Die zunehmende Komplexität der Energiequellen von Vatajankoski und ihrer Eigenschaften sowie die größere Speicherkapazität machten deutlich, dass digitale Hilfsmittel erforderlich sind, um die verschiedenen Anlagen unter dem Gesichtspunkt des wirtschaftlichen und ökologischen Fußabdrucks optimal zu betreiben. Vatajankoski kombinierte auch die Regelung der Nachfrage auf Gebäudeebene mit der Produktionsoptimierung und erreichte dadurch zusätzliche Flexibilität zur Optimierung der Produktion. Mit den KI-basierten Danfoss Leanheat-Tools kann das Unternehmen die thermische Masse des Gebäudes als virtuellen Energiespeicher nutzen, was den Einsatz von Spitzenlastkesseln minimiert und mehr Möglichkeiten bietet, von schwankenden Strompreisen zu profitieren. Die Betriebsdaten zeigen einen klaren Wert im Vergleich zum Basisbetrieb ohne KI-basierte Regelung und Optimierung.

„Wir setzen die Heizungsoptimierung seit 2018 ein, und unsere Wärmekunden haben davon sowohl energetisch als auch finanziell profitiert. Die Verbrauchsspitzen und damit auch die Erzeugungsspitzen sind deutlich zurückgegangen, so dass jetzt weniger Spitzenerzeugungsanlagen benötigt werden. Wenn der Strompreis schwankt, trägt die Optimierung der Stromproduktion den Preisen gut Rechnung. Wir können die Stromerzeugung priorisieren und die Produktion von einer Anlage auf eine andere verlagern. Der virtuelle Wärmespeicher hat ein großes Anpassungspotenzial, und wir setzen große Erwartungen in ihn. Obwohl wir ein relativ kleines Fernwärmenetz haben, ist die Gebäudemasse groß. Wir erwarten, dass wir mit dem virtuellen Speicher einen noch größeren Teil der verkauften Wärme abdecken können.“

Lauri Hölttä, Produktionsleiter bei Vatajankoski/Finnland

6.3. Digitalisierung der Infrastruktur, Fokus: Digitale Zwillinge

Dieser Beitrag wurde koordiniert und verfasst von: Edmund Widl, AIT und stellt den Hauptteil des gleichnamigen Abschnitts des internationalen Guidebooks dar.

Das IEA DHC Annex TS4 Guidebook bietet einen Überblick über eine Vielzahl von Anwendungen zur Verbesserung des FWK-Betriebs und der Wartung, die durch die Digitalisierung ermöglicht werden können. Dieses Kapitel konzentriert sich auf *Digitale Zwillinge* für den Einsatz dieser digitalen Technologien im Feld und führt Sensordaten, Netzwerkinformationen und Algorithmen zusammen, um digitale Dienste zu erstellen, die FWK-Infrastrukturbetreiber:innen bei ihrer täglichen Arbeit unterstützen.

Dieses Kapitel gibt eine Einführung in das Konzept des Digitalen Zwillings und beleuchtet konkrete Anwendungsbereiche für Digitale Zwillinge im Kontext von FWK-Betrieb und -Wartung. Um den praktischen Wert dieses Ansatzes zu verdeutlichen, werden Best-Practice-Beispiele aus Österreich für den Einsatz Digitaler Zwillinge für die FWK-Infrastruktur vorgestellt.

6.3.1. Was ist ein Digitaler Zwilling?

Der Digitale Zwilling ist ein Konzept, das sich als vielversprechender Ansatz zur Simulation und Replikation realer Objekte oder Systeme in einer digitalen Umgebung herausgestellt hat. Laut (Glaessgen & Stargel, 2012) können Digitale Zwillinge als „eine virtuelle Darstellung eines physischen Systems, das zur Überwachung, Steuerung und Optimierung seiner Abläufe verwendet wird“ definiert werden. Mit anderen Worten: Ein Digitaler Zwilling ist ein computergestütztes Modell, welches das Verhalten eines physischen Objekts oder Systems in Echtzeit nachbildet. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Überwachung und Analyse der Systemleistung sowie das Testen verschiedener Szenarien und die Identifizierung potenzieller Probleme, bevor sie im physischen System auftreten.

Laut (Jones et al., 2020) ist ein Digitaler Zwilling eine Nachbildung eines physischen Systems, wenn er die folgenden drei Kriterien erfüllt:

1. **Twinning:** der Vorgang der Synchronisierung des physischen Systems und des virtuellen Gegenstücks
2. **Metrologie:** der Vorgang der Messung des Zustands des physischen Systems und des virtuellen Gegenstücks
3. **Realisierung:** der Akt der Zustandsänderung des physischen Systems und des virtuellen Gegenstücks

Eine andere – aber gleichwertige – Sichtweise besteht darin, einen Digitalen Zwilling über die folgenden drei Eigenschaften zu definieren:

1. **Virtuelles Gegenstück eines physischen Systems:** Ein Digitaler Zwilling umfasst eine digitale Darstellung eines physischen Objekts oder Systems und stellt ein verfeinertes und validiertes Modell für die Vorhersage seines Verhaltens bereit.
2. **Echtzeitausführung:** Die digitale Darstellung wird mit dem physischen System synchronisiert. Die Ausführung erfolgt garantiert innerhalb definierter Zeitschritte mit maximaler Dauer und schnell genug, um Auswirkungen auf die Umgebung zu haben, in der sie stattfindet.

3. **Bidirektionalität der physischen und virtuellen Domäne:** Die Interaktion mit der digitalen Darstellung ist in beide Richtungen möglich. Vom physischen System zum virtuellen Gegenstück umfasst dies typischerweise die Erfassung von Sensordaten. Vom virtuellen Gegenstück zum physischen System kann dies den Zugriff auf Aktoren umfassen (oft auch unter menschlicher Aufsicht).

In den letzten Jahren wurden Digitale Zwillinge in verschiedenen Bereichen eingesetzt, beispielsweise in der Fertigung, wo sie zur Simulation von Produktionsprozessen und zur Optimierung der Effizienz eingesetzt werden (Tao et al., 2018). Im Gesundheitswesen werden Digitale Zwillinge verwendet, um die Auswirkungen verschiedener Behandlungen in der personalisierten Medizin zu modellieren und vorherzusagen (Kamel Boulos & Zhang, 2021). In der Stadtplanung werden Digitale Zwillinge eingesetzt, um Verkehrsmuster zu simulieren und die städtische Infrastruktur zu optimieren (Hu et al., 2022). Laut (Cearley et al., 2017) wird diese Technologie voraussichtlich zu einem Schlüsselfaktor für die digitale Transformation in allen Branchen werden. Der Bericht geht davon aus, dass bis 2021 die Hälfte aller großen Industrieunternehmen Digitale Zwillinge nutzen werden, was zu einer Effizienzsteigerung von 10% führen soll.

Eines der Hauptmerkmale Digitaler Zwillinge ist ihre Fähigkeit, Daten aus mehreren Quellen wie Sensoren, Kameras und anderen Geräten zu integrieren, um eine umfassende und genaue Darstellung des physischen Systems zu erstellen. Dies kann dazu beitragen, Entscheidungsprozesse zu verbessern, indem Echtzeitinformationen über das Verhalten und die Leistung des Systems bereitgestellt werden. Das Konzept der Digitalen Zwillinge ist in den letzten Jahren immer beliebter geworden, da es das Potenzial hat, ein genaueres und umfassenderes Verständnis physischer Systeme zu ermöglichen.

Das Konzept des digitalen Zwillings hat sich parallel zur steigenden Marktnachfrage und dem technologischen Fortschritt weiterentwickelt (Rasheed et al., 2020). Durch die kontinuierliche Arbeit mit Sensordaten nahezu in Echtzeit liefern Digitale Zwillinge die notwendigen Informationen, um eine fundierte Entscheidungsfindung zu unterstützen. Darüber hinaus wird das Konzept des Digitalen Zwillings häufig verwendet, um Vorhersagen über zukünftige Szenarien zu treffen. Digitale Zwillinge werden auch häufig verwendet, um den Service zu verbessern, indem sie den Gesamtbetrieb und die Wartung des physischen Systems überwachen und ungewöhnliche Vorgänge im System erkennen und melden (Melesse et al., 2020). Darüber hinaus kann ein Digitaler Zwilling den Produktlebenszyklus über digitale Plattformen dokumentieren und den Betrieb verbessern, indem er vom Support Feedback zu Dienstleistungen und Produkten erhält.

6.3.2. Anwendungsbereiche für Digitale Zwillinge in FWK

Die Kapitel 5 und 6 des IEA DHC Annex TS4 Guidebook bieten einen Überblick über ein breites Spektrum digitaler Technologien mit hoher Relevanz für FWK-Anwendungen. Das oben beschriebene Konzept des Digitalen Zwillings ermöglicht es, diese bereits verfügbaren digitalen Technologien zu nutzen und für den Betrieb und die Wartung von FWK-Systemen einzusetzen.

Aus der Sicht der Betreiberinnen und Betreiber von FWK-Netzen und zugehöriger Infrastruktur lässt sich die obige allgemeine Definition des Digitalen Zwillings in eine stärker anwendungsorientierte Sichtweise übertragen. Diese anwendungsorientierte Sichtweise konzentriert sich auf die

spezifischen Bedürfnisse, Voraussetzungen und Vorteile der Verwendung Digitaler Zwillinge für FWK-Anwendungen:

1. **Von offline zu online:** Digitale Zwillinge nutzen verfügbare digitale Technologien und machen sie online verfügbar. Dies eröffnet neue Möglichkeiten zur Unterstützung und/oder Automatisierung bestimmter Aspekte des Betriebs und der Wartung von FWK-Netzen und der zugehörigen Infrastruktur. Beispielsweise können digitale Tools, die typischerweise als Desktop-Anwendungen verwendet werden (z. B. Simulationstools oder Algorithmen für maschinelles Lernen), online verfügbar gemacht werden.
2. **Integration von Sensoren und Aktoren:** Der Fernzugriff auf Sensormessungen ermöglicht einen aktuellen Überblick über den aktuellen thermohydraulischen Zustand des Netzes, der Erzeuger und der Verbraucher / die Verbraucherin. Dieselbe Infrastruktur, die für den Fernzugriff auf Sensoren verwendet wird, kann typischerweise auch zur Fernregelung steuerbarer Anlagen wie Ventile, Pumpen oder Wärmequellen verwendet werden.
3. **Bidirektionale Echtzeitdienste:** Online-Tools ermöglichen zusammen mit aktuellen Sensorinformationen die Erstellung einer digitalen Darstellung (von Teilen) eines FWK-Netzes, die mit dem realen System synchronisiert ist. Dies erleichtert die Bereitstellung von Echtzeitdiensten zur Analyse des aktuellen und zukünftigen Zustands des Systems. Durch die Integration fernsteuerbarer Anlagen wird die bidirektionale, (halb-)automatisierte Interaktion mit dem FWK-Netzwerk ermöglicht und so der Übergang von traditionellen passiven Netzwerken zu intelligenten Energiesystemen ermöglicht.

Abbildung 3 zeigt ein schematisches Beispiel, wie ein Digitaler Zwilling genutzt werden könnte, um bestehende digitale Technologien in den Betrieb und die Wartung eines FWK-Netzes zu integrieren. Typische Desktop-Anwendungen – wie Simulationsmodelle oder GIS-Modelle – können online zur Verfügung gestellt und mit Messdaten und historischen Daten verknüpft werden, um eine digitale Darstellung eines FWK-Systems zu erstellen. Daher ermöglichen Digitale Zwillinge die Bereitstellung neuer Dienste, die entweder Betreiber:innen unterstützen (offener Regelkreis) oder Prozesse automatisieren können (geschlossener Regelkreis).

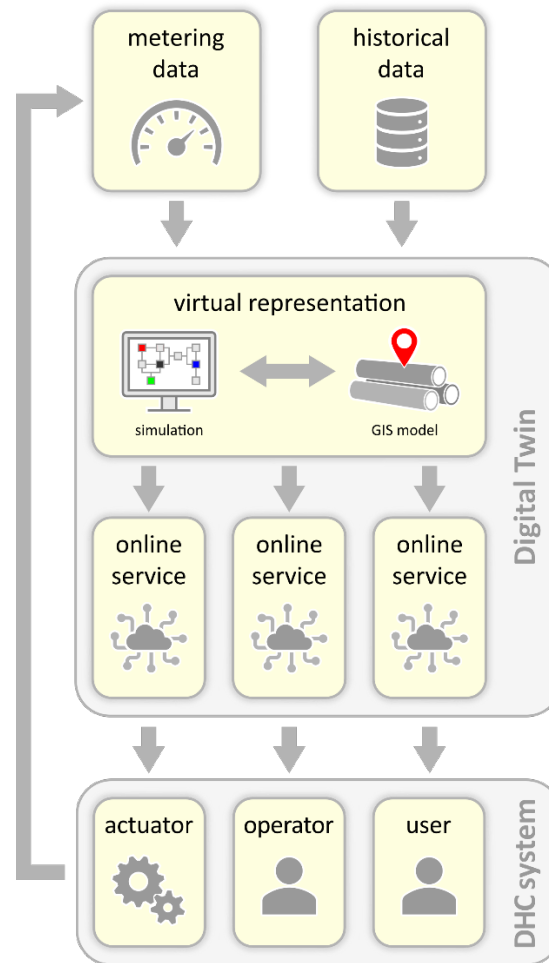


Abbildung 3: Schematisches Beispiel eines Digitalen Zwillings für FWK-Systeme.

Die folgende Liste gibt einen (nicht erschöpfenden) Überblick über typische Anwendungsbereiche, die durch diese Services abgedeckt werden können:

- **Überwachung:** Die digitale Darstellung eines FWK-Systems kann zur Datenanreicherung nicht gemessener (oder sogar nicht messbarer) Dinge verwendet werden, sodass der Zustand des gesamten Systems auf der Grundlage einer begrenzten Anzahl von Sensoren geschätzt werden kann. Als Echtzeitdienst implementiert, kann dieser auch zur Diagnose der Qualität von Messungen oder zur Abschätzung des Verbrauchs der Kunden und Kundinnen genutzt werden.
- **Diagnose und Fehlererkennung:** Die Analyse des Zustands eines FWK-Systems kann durch die Erkennung von Problemen zur Verbesserung seines Betriebs beitragen. Als Echtzeitdienst implementiert, können kurzfristige Abweichungen (z.B. hohe Durchflussmengen, niedriger Druck, hohe Rücklauftemperaturen) zur Fehlererkennung genutzt werden und Betreiber:innen und Wartungsteams umgehend benachrichtigt werden. Ebenso geringfügige, aber erhebliche langfristige Abweichungen von der Entwurfsspezifikation können identifiziert und den Betreiber:innen mitgeteilt werden.
- **Prognose:** Aktuelles Wissen über das Netz und Schätzungen des Verhaltens der Kunden und Kundinnen können als Grundlage für kurzfristige Prognosen des erwarteten Verbrauchs

genutzt werden. Als Echtzeitdienst implementiert, kann dies ein wesentlicher Faktor für effektive Intraday-Flexibilität und Energiehandel sein.

- **Betriebsoptimierung:** Die digitale Darstellung eines FWK-Systems kann verwendet werden, um Ansätze zur modellprädiktiven Steuerung zur Optimierung seines Betriebs anzuwenden. Als Echtzeitdienst implementiert, kann dieser zur Automatisierung des Anlagenbetriebs oder der hydraulischen Steuerung des Netzwerks genutzt werden. Alternativ kann dies auch als Entscheidungsunterstützungssystem für Netzbetreiber genutzt werden, die die vorgeschlagenen Steuerungsmaßnahmen prüfen, bevor sie diese umsetzen.

Neben der Nutzung Digitaler Zwillinge zur Unterstützung des Betriebs und der Wartung von FWK-Systemen können sie auch im Laborkontext eingesetzt werden. **Durch die Integration eines Digitalen Zwillings in eine Testumgebung kann er als Ersatz für (einen Teil) eines realen Systems dienen und als virtuelle Komponente zwischen realer Hardware fungieren.** Die Motivation dahinter kann entweder sein, dass die Durchführung von Tests am realen System nicht sicher wäre oder das (Sub-)System mit der im Labor verfügbaren Ausrüstung nicht realisierbar ist. Typische Anwendungsgebiete für den Einsatz von Digitalen Zwillingen in Testumgebungen sind Funktionstests neuer Steuerungsschemata für den Betrieb von Netzwerken und cyber-physikalische Sicherheitstests. Für diese Art von Anwendungen ist die Bereitstellung von Diensten in der Regel weniger wichtig, wohingegen die genaue digitale Darstellung des realen Systems und die Möglichkeit, in Echtzeit mit ihm zu interagieren, von entscheidender Bedeutung sind.

6.3.3. Beispielanwendungen

Im Folgenden werden Beispiele aus Österreich für die Anwendung des Konzepts eines Digitalen Zwillings auf FWK-Systeme beleuchtet. Diese Beispiele zeigen die verschiedenen Anwendungsbereiche, für die Digitale Zwillinge nützlich sind, und veranschaulichen, welche Herausforderungen sie bewältigen können und welche Vorteile sie bieten. Sie zeigen, dass Digitale Zwillinge je nach Anwendungsbereich unterschiedliche Eigenschaften benötigen, beispielsweise hinsichtlich der zeitlichen / räumlichen Auflösung der digitalen Darstellung des FWK-Systems.

Es ist jedoch wichtig darauf hinzuweisen, dass der Prozess der Erforschung der neuen Möglichkeiten für FWK-Anwendungen, die das Digital Twin-Konzept bietet, noch im Gange ist. Dies spiegelt sich darin wider, dass die Beispiele sowohl innovative kommerzielle Produkte als auch Machbarkeitsstudien aus Forschungsprojekten abdecken. Daher gehen die Beispiele auch auf offene Fragen und Barrieren für den Rollout in realen Anwendungen ein.

6.3.4. Arteria-Plattform

Die Arteria-Plattform (www.arteria-tech.com) hilft Energieunternehmen, ihre Wärmenetze effizienter zu planen und zu betreiben und so Kosten zu sparen und CO₂-Emissionen zu reduzieren. Basierend auf einem Digitalen Zwilling und maßgeschneiderten Online-Diensten stellt es die digitale Infrastruktur für die Umwandlung von Wärmenetzen in intelligente Wärmenetze bereit durch:

- GIS-integrierte Digitalisierung von Wärmenetzkomponenten (Rohre, Generatoren, Verbraucher etc.),

- schnelle und einfache Return-of-Investment-Analyse der Wärmenetzplanung (neue Verbraucheranschlüsse, Abwärmeintegration etc.) und
- optimale Steuersignale für dezentrale Erzeuger und FW-Umformstation (Merit-Order-Prinzip).

Die Arteria-Plattform bietet eine benutzerfreundliche Oberfläche, die die virtuelle Darstellung des Wärmenetzes erleichtert, siehe Abbildung 4. Beispielsweise können Netzwerke definiert werden, indem einzelne Systemkomponenten (z.B. Rohre, Heizanlagen, Verbraucher) in einem grafischen Editor gezeichnet werden. Zugehörige zeitabhängige Versorgungs- und Verbrauchsdaten können hinterlegt werden. Arteria bietet seinen Kunden und Kundinnen sowohl SaaS- als auch Beratungsdienstleistungen an. Die Plattform kann entweder in der Cloud gehostet (MS Azure) oder in die lokale Infrastruktur eines Unternehmens integriert werden (On-Premise-Lösung).

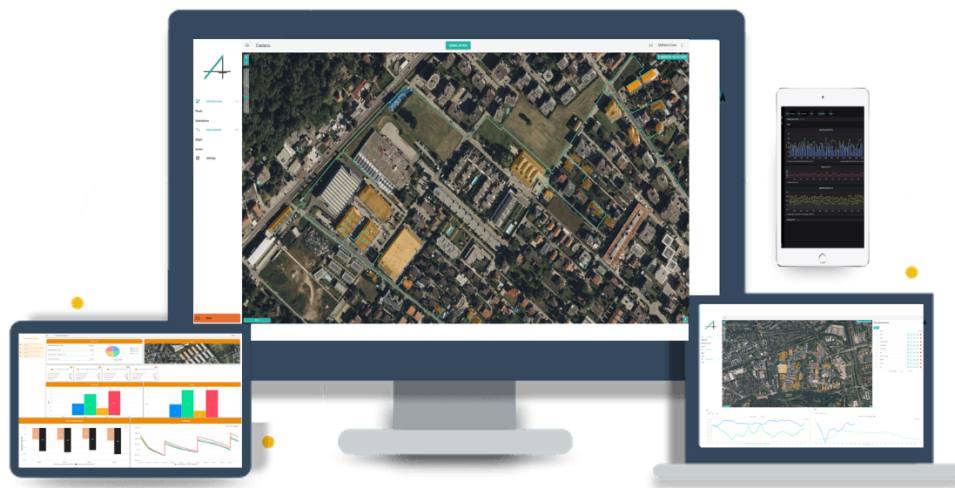


Abbildung 4: Von der Arteria-Plattform bereitgestellte Benutzeroberflächen, Beispielimplementierung

- Vollständige GIS-Integration und Analyse der Betriebseffizienz des FW-Netzwerks in Caslano (Schweiz) mithilfe der Analyse des Digitalen Zwillings, was zur Erkennung hoher Verluste aufgrund ineffizienter Steuerung führte
- Planung eines neuen Fernwärmenetzes in Brüssel (Belgien) als Teil eines Masterplans zum Gasausstieg bis 2040
- Echtzeitsteuerung eines Fernwärmenetzes in Mischendorf (Österreich) auf Basis digitaler Zwillinge von FW-Umformstation und Heizwerkskomponenten
- Dashboard für den FW-Betreiber in Bottrop (Deutschland)

Vorteile

- Die Arteria-Plattform basiert auf einem neuartigen thermohydraulischen Gleichungslöser in Kombination mit selbstlernenden KI-Modellen, der die Simulation gemaschter, komplexer und verteilter FW-Netzwerke jeder Größe und Komplexität ermöglicht. Durch eine intelligente Kombination aus Physik und KI ist für den Aufbau des Digitalen Zwillings ein Minimum an Betriebsdaten erforderlich.
- Betriebseffizienzen basieren auf Energie- und Exergiekostenanalysen und liefern Informationen über die tatsächlichen Versorgungskosten an jedem Punkt im Netzwerk. Diese

Informationen ermöglichen die Identifizierung von Ineffizienzen im Betrieb, die durch herkömmliche Temperaturanalysen nicht erkennbar sind.

Barrieren und Herausforderungen

- Aktuelle Hindernisse betreffen die Qualität und Verfügbarkeit der Daten an den Standorten selbst sowie fehlende Routinen und Best Practices für die Nutzung softwarebasierter Engineering-Dienstleistungen. Beispiele sind fehlende oder fehlerhafte Zeitstempel in Zeitreihendaten sowie falsche oder fehlende GIS-Daten von Netzwerken. Darüber hinaus werden viele Anwendungsfälle derzeit mit Hilfe von Tabellenkalkulationen und der Datenübertragung per E-Mail abgewickelt. Dies führt zu langen Bearbeitungszeiten und verpasst die Chance, Szenarien auf der Grundlage sich schnell ändernder Umgebungen schnell zu bewerten.

6.3.5. DigitalEnergyTestbed

Die Digitalisierung der Wärmebranche stellt neue Herausforderungen an die Entwicklung neuer Komponenten und den Einsatz von Automatisierungs- und Steuerungslösungen. Auch wenn die Grundlagentechnologien auf Komponentenebene gut verstanden sind, sind ihre Auswirkungen auf Systemebene noch Gegenstand von Untersuchungen. In diesem Zusammenhang hat das Forschungsprojekt DigitalEnergyTestbed (Widl et al., 2022) das Konzept und die prototypische Umsetzung einer Testumgebung zur Laborvalidierung intelligenter Anwendungen in Wärmenetzen vorgestellt.

Der DigitalEnergyTestbed-Prototyp umfasst einen Prüfstand für eine FW-Umformstation. Die Inbetriebnahme dieses Prüfstandes als Teil des Prototyps für den vollautomatisierten und unbeaufsichtigten Betrieb über längere Zeiträume ist komplex und zeitaufwändig. Daher wurde ein voll funktionsfähiger Digitaler Zwilling des Prüfstands als Ersatz für die Durchführung von Vorbewertungen verwendet. Darüber hinaus ist die Verfügbarkeit des Prüfstandes begrenzt und sein Betrieb erfordert geschultes Personal. Daher kann der Digitale Zwilling für die schnelle Entwicklung und Erprobung neuer Anwendungen genutzt werden.

Beispielimplementierung

Der DigitalEnergyTestbed-Prototyp dient als Machbarkeitsnachweis für eine offene Testumgebung für Anwendungen im Kontext eines integrierten Energiesystems. Es ermöglicht die Bereitstellung domänenübergreifender Testanwendungen in einer Echtzeitumgebung unter Verwendung einer Kombination aus Laborgeräten und Simulationsmodellen. Die Basistechnologie hinter dem DigitalEnergyTestbed-Prototyp ist Lablink, eine Open-Source-Middleware, die für die Verwaltung und Datenübertragung zwischen verteilten Clients verantwortlich ist. Lablink stellt verschiedene Clients zur Verfügung, die speziell für den Zugriff auf Hardware (z.B. Laborgeräte) und Software (z.B. Simulationstools) entwickelt wurden.

Als Machbarkeitsnachweis wurde ein Testfall ausgewählt, der die Auswirkungen eines spezifischen Schemas für Demand-Response (DR) auf ein FW-System bewertet. In Zeiten hoher Wärmenachfrage wird der Wärmefluss vom Fernwärmenetz zu den Wärmeverbrauchern reduziert, indem die sekundäre Versorgungstemperatur der FW-Umformstation um 5 °C gesenkt wird. Die dadurch entstehende Temperaturdifferenz zur Soll-Vorlauftemperatur wird durch lokale Booster-Wärmepumpen ausgeglichen. Dieses DR-Schema wird mithilfe einer einfachen Steuerung

implementiert, die ein Signal an die FW-Umformstation sendet, um die Temperatursenkung auszulösen. Abbildung 5 zeigt eine schematische Ansicht dieser Systemkonfiguration (wobei der größte Teil des FW-Netzes aus Platzgründen nicht dargestellt ist).

Abbildung 6 zeigt, wie die Systemkonfiguration aus Abbildung 5 auf ein tatsächliches DigitalEnergyTestbed-Setup abgebildet wurde. Enthalten ist der Digitale Zwilling der FW-Umformstation als Prüfling im Prüfstand, verknüpft in Echtzeit mit detaillierten Simulationen seiner Primärseite (FW-Netz) und Sekundärseite (Booster-Wärmepumpe und Gebäude). Der Digitale Zwilling besteht aus einem OPC UA-Server, dessen Endpunkte den Sollwerten für den Prüfstand (primäre Vorlauftemperatur, sekundäre Rücklauf-temperatur, sekundärer Massenstrom usw.) und Messungen vom Prüfstand (primäre Rücklauf-temperatur, sekundäre Vorlauftemperatur, Primärmassenstrom) entsprechen. Anstatt diese Endpunkte jedoch mit realer Hardware zu verknüpfen, wird intern ein thermohydraulisches Modell des Prüfstands ausgeführt, das mit einer festen Kommunikationsschrittgröße (10 Sekunden) in Echtzeit synchronisiert wird.

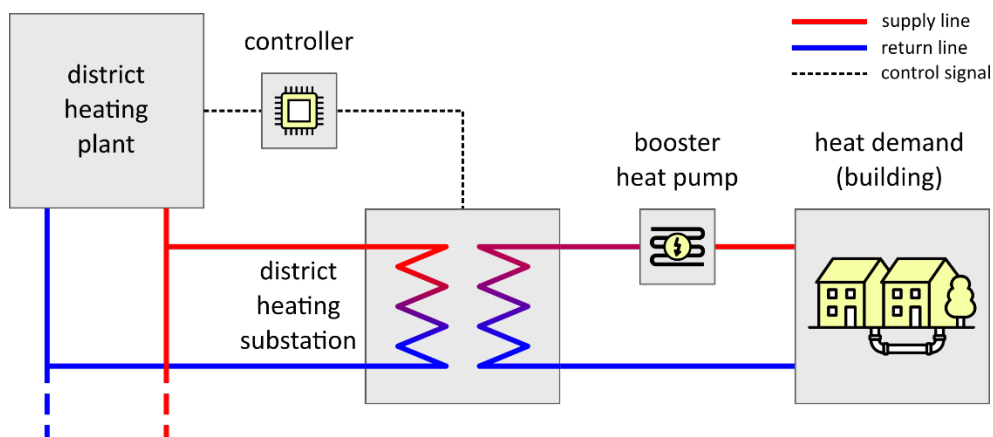


Abbildung 5: Schematische Ansicht des Testfalls für den DigitalEnergyTestbed-Prototyp.

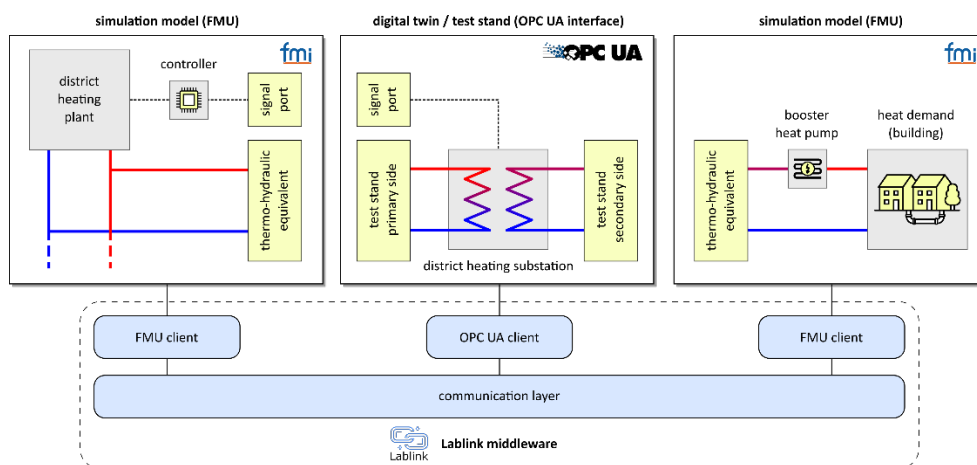


Abbildung 6: Implementierung des Testfalls als DigitalEnergyTestbed-Setup unter Verwendung des Digitalen Zwillings des Teststands für die FW-Umformstation als zentrale Komponente.

Vorteile

Das DigitalEnergyTestbed ermöglicht die Bewertung von Digitalisierungslösungen auf Systemebene. Es bietet eine Plattform für schnelle Entwicklung und Tests mithilfe des Digitalen Zwillings. Letzterer

kann problemlos durch den echten Prüfstand ersetzt werden, der die Validierungstests durchführt. Die Verwendung Digitaler Zwillinge als Teil der Testumgebung bietet zwei wesentliche Vorteile:

- Die Inbetriebnahme eines Testaufbaus mithilfe eines Digitalen Zwillings kann ohne das Risiko einer Fehlbedienung oder einer Beschädigung des ausgetauschten Geräts oder (Sub-)Systems erfolgen. Dies ist besonders nützlich, wenn kritische Betriebsbedingungen getestet werden.
- Der Einsatz Digitaler Zwillinge kann die Verfügbarkeit von Testaufbauten verbessern. Während Setups mit Hardwarekomponenten in der Regel teurer und komplexer zu replizieren sind, können digitale Zwillinge in vielen Fällen mit weniger Aufwand repliziert werden.

Barrieren und Herausforderungen

- Das interne Modell des Digitalen Zwillings muss sorgfältig auf das reale System abgestimmt und kalibriert werden. Dieser Abgleich muss mit hoher Genauigkeit erfolgen und die Dynamik des realen Systems mit hoher Genauigkeit nachbilden. Die Kalibrierung des Modells ist in Off-Design-Situationen besonders anspruchsvoll.

6.3.6. Schlussfolgerungen

Digitale Zwillinge ermöglichen die Nutzung digitaler Technologien und setzen diese für den Betrieb und die Wartung von FWK-Netzen ein. Digitale Zwillinge bedienen sich verfügbarer digitale Tools und machen diese online verfügbar. Digitale Zwillinge ermöglichen die Bereitstellung von Echtzeitdiensten, die entweder Betreiber:innen unterstützen oder Prozesse automatisieren können. Durch die Integration fernsteuerbarer Anlagen wird die bidirektionale, (halb-)automatisierte Interaktion mit dem FWK-System und der Übergang von traditionellen passiven Netzwerken zu intelligenten Energiesystemen ermöglicht. Dies eröffnet neue Möglichkeiten zur Unterstützung und/oder Automatisierung bestimmter Aspekte des Betriebs und der Wartung von FWK-Netzen und der zugehörigen Infrastruktur, insbesondere für Überwachung, Diagnose und Fehlererkennung, Prognose und Betriebsoptimierung.

6.4. Geschäftsmodelle: Einführung

Neue, disruptive Technologien - wie die Digitalisierung der Fernwärme - erfordern nicht nur die technische Umsetzung in bestehenden Infrastrukturen, sondern auch eine Umstrukturierung der bisherigen Betriebsstrategien. Gleichzeitig müssen Prozesse zur Monetarisierung der neuen Technologien eingeleitet werden. Ein Geschäftsmodell ist eine anschauliche Darstellung wie eine Institution oder ein Unternehmen einen Mehrwert für die Kunden und Kundinnen schaffen und einen Profit für sich selbst sichern kann.

Im Folgenden wird erläutert, wie die Digitalisierung neue und innovative Geschäftsfelder beim Betrieb bestehender Fernwärmenetze (DHN) ermöglichen kann. Dieser Abschnitt ist ein Extrakt aus dem internationalen Guidebook, er fasst die wesentlichen Ergebnisse der Österreichischen Beteiligung am IEA DHC Annex TS4 zusammen, wobei der Fokus lag auf Geschäftsmodellen für

- die Reduktion der Rücklauftemperaturen im Wärmenetz und
- die Integration von Wärmepumpen im Stromnetz.

Abschließend werden mögliche Geschäftsmodelle für digitale Technologien in Fernwärmenetzen in Österreich sowie rechtliche/ regulative Randbedingungen zusammengefasst.

6.5. Geschäftsmodelle, Fokus: Reduktion der Rücklauftemperaturen im Wärmenetz

Dieser Beitrag wurde koordiniert und verfasst von: Ralf-Roman Schmidt, AIT, basierend auf den Ergebnissen des Projekts T2LowEx (Müller A. et al. 2021)

Zu den alternativen Wärmequellen für Fernwärmenetze gehören im Wesentlichen Abwärme, Solar- und Geothermie sowie Wärmepumpen. Im Gegensatz zu der Wärmeerzeugung in klassischen Heizwerken (d.h. reinen Heizkesseln und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen) entfalten diese Wärmequellen ihr volles Potenzial erst bei niedrigen Temperaturniveaus bzw. ihre Effizienz sinkt mit steigenden Netztemperaturen erheblich (Geyer et al., 2021). Für den Neubau von Fernwärmenetzen werden Niedertemperaturnetze seit etwa 10 Jahren diskutiert und getestet (Averfalk et al., 2021). Diese Entwicklung ist wichtig und notwendig, für bestehende Fernwärmenetze sind allerdings andere Strategien erforderlich – und hier kann die Digitalisierung ein wesentlicher „Enabler“ sein.

Obwohl in bestehenden Netzen die Ursachen für hohe Netztemperaturen bekannt und beherrschbar sind, liegen sie meist auf der Abnehmerseite (z.B. fehlerhafte Anlagenkomponenten oder falsche Regelstrategien). Nun ist aber derjenige, der die Investitionen für die Optimierung tragen soll (im Regelfall die Gebäudeeigentümerin bzw. der Gebäudeeigentümer), oftmals ein anderer als derjenige, der von niedrigeren Rücklauftemperaturen profitiert (Betreiber oder Benutzer / Benutzerin des Gebäudes, im Regelfall Bewohner / Bewohnerinnen). Effektive Strategien zur Temperatursenkung müssen sich daher auf den Gebäudebestand und deren Heizungsanlagen sowie die jeweiligen Kunden und Kundinnen bzw. die Wärmelieferverträge konzentrieren.

6.5.1. Geschäftsmodelle als Anreiz zur Temperatursenkung

Die Durchführbarkeit von Maßnahmen zur Senkung der Rücklauftemperaturen hängt nicht nur von ihrer Kosteneffizienz ab, d. h. von den erzielten Kosteneinsparungen im Vergleich zu den Kosten der Maßnahme, sondern auch von technischen Beschränkungen und dem Eigentum an bzw. dem Zugang zu den Kundenanlagen. Wie bereits erwähnt, kommen die Einsparungen durch niedrigere Netztemperaturen im Allgemeinen dem Wärmelieferanten zugute, die Kosten werden jedoch von den Kundenanlagen verursacht. Um diese Faktoren zu berücksichtigen, wurden im Rahmen des österreichischen Projekts T2LowEx (Müller A. et al. 2021) verschiedene Geschäftsmodelle entwickelt und mit den am Projekt beteiligten Wärmeversorgungsunternehmen diskutiert (siehe auch Leoni et al., 2020 und Geyer et al., 2021a):

1. Eigeninvestition: Der Wärmelieferant übernimmt die Investition und führt die rücklauftemperatursenkenden Maßnahmen beim Kunden oder bei der Kundin durch. Die "Rückzahlung" der Investition wird durch Einsparungen bei den Betriebskosten realisiert.

| | |
|---|---|
| Vorteile: Dies ist das "Standard-" bzw. "Referenz"-Geschäftsmodell. Energieversorger verfügen in der Regel über das Know-how zur Behebung von Störungen und können das Geschäftsmodell direkt umsetzen | Nachteile: Das Investitionsrisiko liegt beim Energieversorger, und es kann sein, dass er Zugangsbeschränkungen zu den Kundenanlagen hat. Manchmal mangelt es an Interesse und/oder es gibt Haftungsprobleme im Zusammenhang mit Investitionen in Kundenanlagen. Außerdem sind einige Installationen komplex, und insbesondere kleinere Energieversorger haben möglicherweise kein technisches Personal zur Verfügung |
|---|---|

2. Kundenmotivation/Motivationstarife: Der Kunde bzw. die Kundin übernimmt die Investition oder führt die Maßnahmen selbst durch, die "Rückzahlung" der Investition erfolgt durch einen Bonus in Abhängigkeit von der Rücklauftemperatur.

| | |
|---|---|
| Vorteile: Für dieses Geschäftsmodell gibt es viele Best-Practice-Beispiele. Es kann auch direkt durch den Energieversorger umgesetzt werden und ist leicht auf das gesamte Netz skalierbar. Es kann Verhaltensänderungen fördern, die Investitionsrisiken liegen beim Kunden oder bei der Kundin | Nachteile: Nachteilig ist, dass Motivationstarife für den Kunden / die Kundin nicht immer leicht zu verstehen, und im Falle eines Malus (wenn die Rücklauftemperaturen zu hoch sind) kann dies zu einer geringen Kundenzufriedenheit führen. Außerdem hat der Kunde manchmal wenig Wissen über und Zugang zu dem System. Schließlich sind bestehende Wärmelieferungsverträge oft langfristige und nicht leicht anzupassen, und in einigen Fällen ist eine Abrechnung nach Temperaturniveaus möglicherweise nicht zulässig. |
|---|---|

3. Darlehen, wie z.B. Crowdfunding: Externe Investoren übernehmen die Investition, die Rückzahlung inklusive Zinsen erfolgt über einen vereinbarten Zeitraum.

| | |
|--|---|
| <p>Vorteile: Dieses Geschäftsmodell bietet einen neuen Finanzierungsweg für den Energieversorger, einschließlich einer möglichen Bürger:innen-Beteiligung, und könnte auch für Genossenschaften attraktiv sein. Eine Option könnte die Realisierung einer Online-Crowdfunding-Plattform sein, die den Bekanntheitsgrad des Energieversorgers und die Transparenz erhöht und das Angebot zusätzlicher Dienstleistungen ermöglicht.</p> | <p>Nachteile: Auf der anderen Seite fehlen Garantien für die externen Investoren hinsichtlich der Rückzahlungen, auch könnte es Probleme mit dem Datenschutz für die Kund:innen-Anlagen geben.</p> |
|--|---|

4. Contracting: Ein externer Contractor führt die Maßnahme beim Kunden oder der Kundin vor Ort durch. Die Maßnahmen können nach dem Bestbieterprinzip ausgeschrieben und vergeben werden; die Rückzahlung der Investition kann über eine Beteiligung an den tatsächlichen Einsparungen erfolgen.

| | |
|--|---|
| <p>Vorteile: Dieses Geschäftsmodell könnte es ermöglichen, dass die Korrekturmaßnahmen aufgrund von Skaleneffekten kosteneffizient sind (der Auftragnehmer könnte viele Trinkwassernetze optimieren). Das Risiko wird zwischen dem Auftragnehmer und dem Energieversorger geteilt. Außerdem können die Energieversorger als Auftragnehmer außerhalb ihres eigenen Netzgebiets tätig werden, um ihr Personal besser auszulasten.</p> | <p>Nachteile: Zu den negativen Aspekten gehören die oft kurzfristige Sichtweise vieler Vertragspartner:innen und, falls Problemen beim Contractor auftauchen sollten, ein mögliches negatives Verhältnis zwischen Energieversorger und Kund:innen. Die Vertragsgestaltung könnte kompliziert sein, und es sind Maßnahmen zum Schutz der Kund:innen-Daten erforderlich.</p> |
|--|---|

Eine der wichtigsten Schlussfolgerungen war, dass die ersten beiden Geschäftsmodelle (Eigeninvestition und Kundenmotivation) als die realistischsten angesehen werden. Es ist jedoch anzumerken, dass die Auswirkungen von reduzierten Rücklauftemperaturen in großen Wärmenetzen nur indirekt gemessen werden können, so dass Einsparungen durch einzelne Maßnahmen nur theoretisch bewertet werden können.

Schließlich wurde das Kosten-Nutzen-Verhältnis für jedes Geschäftsmodell anhand konkreter Fallbeispiele mit einem speziellen Excel-basierten Berechnungstool ermittelt. Im Ergebnis zeigte sich, dass die betrachteten Wärmenetze hinsichtlich der erzielten Einsparungen sehr unterschiedlich sind. Insbesondere bei Wärmenetzen mit hohen Anteilen an erneuerbaren Wärmequellen (z.B. Geothermie) lassen sich sinnvolle Geschäftsmodelle für rücklauftemperatursenkende Maßnahmen finden.

6.5.2. Digitalisierung als Enabler

Die fortschreitende Digitalisierung der Wärmenetze kann eine wesentliche Maßnahme zur Realisierung derartiger Geschäftsmodelle sein. Zum einen wäre es notwendig, kostengünstige Wärmehähler weiterzuentwickeln, die neben der Wärmemenge standardmäßig auf weitere relevante Parameter (z.B. Volumenstrom, Temperaturdifferenzen) geeicht sind. Dies kann eine Weiterentwicklung der derzeitigen Mess- und Eichvorschriften erfordern. Mit Hilfe dieser Daten kann die Digitalisierung die Identifizierung von Kund:innen-Anlagen mit hohen Rücklauftemperaturen unterstützen. Zum anderen kann die Digitalisierung dabei helfen, mögliche Ursachen für hohe Rücklauftemperaturen zu visualisieren, den Kunden oder der Kundin Gegenmaßnahmen vorzuschlagen und mögliche Auswirkungen z.B. auf die Motivationstarife zu berücksichtigen.

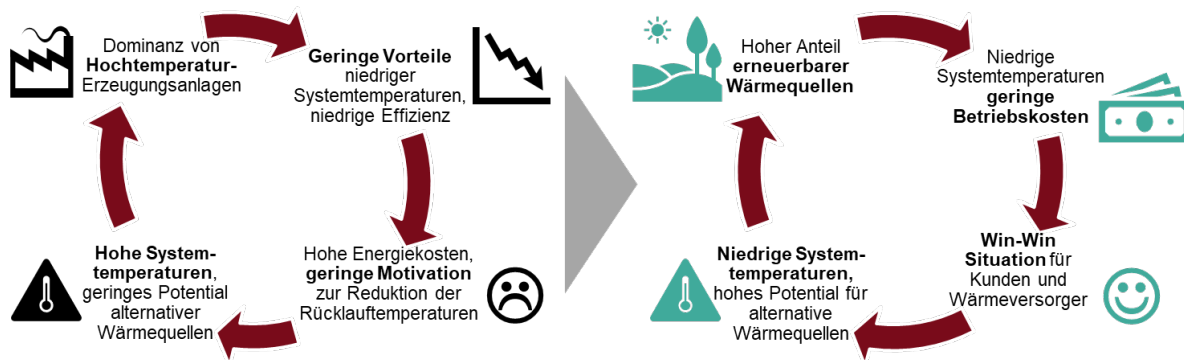


Abbildung 7: Links: Der Teufelskreis der hohen Systemtemperaturen (Lock-in), rechts: Der Mehrwert von niedrigen Systemtemperaturen.

6.5.3. Niedrige Temperaturen als Schlüssel zum langfristigen Erfolg

Niedrige Temperaturniveaus sind eine wesentliche Voraussetzung, um die Rolle der Fernwärme auch in einem zukünftigen CO₂-neutralen Energiesystem zu stärken (siehe Abbildung 7). Die größte Herausforderung ist die derzeitige Dominanz von Hochtemperaturerzeugern und die Tatsache, dass die Optimierung von kundenversorgten Anlagen oft in der Verantwortung der Kunden oder Kundinnen liegt. Die im Projekt T2LowEx entwickelten und erprobten Methoden und Konzepte können Wärmeversorgungsunternehmen dabei unterstützen, Temperatursenkungspotenziale auf der Abnehmerseite zu identifizieren, wirtschaftlich zu bewerten, zum Nutzen der Kunden und Kundinnen und des Energieversorgers umzusetzen und damit die Weichen für ein nachhaltiges Fernwärmenetz zu stellen.

6.6. Geschäftsmodelle, Fokus: Wärmepumpen im Stromnetz

Beitrag koordiniert und verfasst von: Veronika Wilk, AIT basierend auf Arbeiten im IEA HPT Annex 56.

Die Digitalisierung ist ein bedeutender Faktor in der Energiewende. Intelligente, digitale Lösungen sind zunehmend gefragt, um die verschiedenen Flexibilitätsoptionen, wie strombasierte Wärmezeugung, Einsatz von Speichern und Elektromobilität effizient einzusetzen sowie die Netze sicher zu steuern. Wärmepumpen sind eine vielfältig einsetzbare Technologie zur Raum- und Prozesswärmebereitstellung, zur Warmwasserbereitung sowie Kühlung von Gebäuden und Prozessen. Sie haben großes Potenzial, einen substanziellen Beitrag zur Dekarbonisierung zu leisten. Laut dem IEA Bericht "Net Zero by 2050" müssen weltweit insgesamt 1800 Millionen Wärmepumpen in Gebäuden installiert werden, um mehr als die Hälfte des Heizbedarfs zu decken. Das ist eine Verzehnfachung gegenüber dem Stand von 2020 (IEA, 2021). Mit der fortschreitenden Digitalisierung werden Wärmepumpen zunehmend für eine intelligente Bedarfsdeckung ausgelegt und ermöglichen damit Betriebsinformationen in Echtzeit, flexible Stromnutzung, optimierte Lastprofile sowie ein optimiertes Zusammenspiel in Bezug auf Komfort und Betriebskosten. Wärmepumpen werden zu vernetzten Geräten, die am Internet der Dinge (IoT) teilnehmen. Sie werden mit Sensoren, Aktuatoren, Netzwerkkonnektivität und Software ausgestattet, um Daten zu sammeln und auszutauschen. Damit wird es möglich, den Wärmepumpen-Nutzern und -Nutzerinnen den bestmöglichen Komfort zu bieten, den Energieverbrauch von Gebäuden und Prozessen weiter zu optimieren, um so einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung der Wärme- und Kälteversorgung zu leisten.

Im IEA Projekt HPT Annex 56 wurden die Chancen und Herausforderungen für IoT-fähige Wärmepumpen analysiert. Ziel des Projektes ist ein strukturierter Überblick zu IoT-fähigen Wärmepumpen. Eine der Aufgaben war die Beschreibung der Marktchancen, die durch vernetzte Wärmepumpen entstehen, sowie die Identifizierung von Erfolgsfaktoren und weiterem Entwicklungsbedarf für Software und Hardware auf der Grundlage von Literatur und Marktforschung. Mehr als 40 verschiedene Anwendungsfälle für IoT-fähige Wärmepumpen wurden gesammelt und analysiert, Factsheets und weitere Informationen finden sich unter <https://heatpumpingtechnologies.org/annex56/>.

Die Anwendungsfälle unterscheiden sich in der Nutzung der Konnektivität, der Art der Daten und der Datenanalyse sowie in der Interaktion mit anderen „Dingen“ im Netzwerk. Konnektivität und IoT sind notwendige Voraussetzungen für jeden Anwendungsfall. Die Anwendungsfälle wurden nach ihrem Hauptzweck in fünf IoT-Kategorien gruppiert. Für vier IoT-Kategorien wurden bereits Geschäftsmodelle und Dienste implementiert:

- Optimierung des Wärmepumpenbetriebs z.B. durch Überwachung und Fernsteuerung, durch Anpassung an Gewohnheiten der Nutzer und Nutzerinnen, durch Anpassung der Heizkurve, durch Planung von Produktions- und Stillstandszeiten, durch kontinuierliche Sollwertanpassung, durch Interaktion mit anderen Komponenten (z.B. PV, Solarthermie, Speicher, etc.) oder zur Nutzung flexibler Tarife
- Vorausschauende Wartung, z. B. durch Erkenntnisse aus Leistungsbenchmarks, Grey-Box-Modellierung, fortschrittliche Datenanalyse usw.

- Bereitstellung von Flexibilität, z. B. durch Pooling von Haushaltswärmepumpen, durch Bereitstellung von Flexibilität als Ausgleichsreserve oder Flexibilität für DSO/TSO für andere Dienstleistungen wie Engpassmanagement oder Spannungsregelung
- Wärme als Dienstleistung, z. B. durch ein anderes Eigentumsmodell (Leasing, Miete, Kauf von Wärme anstelle von Heizgeräten)

Für die Inbetriebnahme des Wärmepumpenbetriebs (z. B. durch Sollwertanpassung, Vergleich mit Leistungsbenchmarks, Erkenntnisse über die Systemauslegung und mögliche Verbesserungen für künftige Installationen, Analyse von Installationsfehlern, Modellierung von Grauzonen, fortgeschrittene Datenanalyse usw.) liegen noch keine Einzelheiten über implementierte Geschäftsmodelle und Dienstleistungen vor. Forschungsprojekte zur Entwicklung und Erprobung der Voraussetzungen für diese Dienste sind jedoch in der Sammlung von Anwendungsfällen verfügbar.

IoT-fähige Wärmepumpen können verschiedene IoT-Dienste anbieten, die mit unterschiedlichen Geschäftsmodellen verbunden sind. In einem intelligenten Stromnetz können IoT-fähige Wärmepumpen für eine intelligente Nachfragesteuerung eingesetzt werden, um Lastspitzen zu reduzieren und/oder den Stromverbrauch in Abhängigkeit vom Strompreis zu optimieren. Präventive Analysen sind für Betreiber von Interesse, da sie beispielsweise Was-wäre-wenn-Analysen für Betriebsentscheidungen und Informationen für die vorausschauende Wartung liefern. IoT-fähige Wärmepumpen können in größere Energiemanagementsysteme integriert werden, z. B. in Gebäuden (BEM), in industriellen Prozessen oder Fernwärmesystemen, wo die bereitgestellten Daten zur Gesamtoptimierung des Prozesses genutzt werden können.

Die Analyse der Geschäftsmodelle ergab, dass mehrere Akteure beteiligt sind. Insgesamt wurden zehn verschiedene Stakeholder:innen identifiziert. Ihre Aufgaben sind in Abbildung X entsprechend dem Lebenszyklus einer Wärmepumpe (Bau, Installation und Betrieb) dargestellt, Tabelle 1 veranschaulicht, welche Interessensgruppen in welche der IoT-Anwendungen involviert sind.

- Unternehmen, die Wärmepumpen herstellen (Hersteller): entwirft und baut Wärmepumpen, verkauft sie an Händler oder Endnutzer und Endnutzerin, bietet auch Wartungsdienste an, tritt in der Regel nicht als Installateur auf
- Unternehmen, die mit Wärmepumpen handeln (Händler): verkauft Wärmepumpen an Endverbraucher / Endverbraucherinnen, bietet auch Wartungsdienste an, tritt in der Regel nicht als Installateur auf
- Installationsunternehmen: Installiert Wärmepumpen und nimmt sie in Betrieb, kann auch Wartungsdienste anbieten
- Nutzer und Nutzerin: sowohl privat als auch industriell, verbrauchen Wärme (und Kälte) an einem Ort, an dem eine Wärmepumpe betrieben wird, können auch für den Betrieb der Wärmepumpe verantwortlich sein, können Spezifikationen für die Auslegung der Wärmepumpe liefern (meist für industrielle Wärmepumpen)
- Betreiber und Betreiberin: ist für den Betrieb der Wärmepumpe verantwortlich, liefert Wärme (und Kälte) an Verbraucher und Verbraucherinnen

- **Aggregator:** fasst eine große Anzahl kleiner Anlagen zu einer großen Anlage zusammen, um Flexibilität auf den Strommärkten oder als Netzdienstleistungen zu vermarkten, und beeinflusst dadurch den Betrieb der Wärmepumpe
- **Lieferant:** versorgt Kunden und Kundinnen mit Strom, handelt an den Strommärkten und produziert manchmal Strom selbst z. B. aus fossilen Brennstoffen oder erneuerbaren Energiequellen
- **Stromnetz:** überträgt und verteilt Strom, verbindet Versorgungsunternehmen und Endverbraucher bzw. Endverbraucherinnen, erfordert einen Ausgleich von Angebot und Nachfrage
- **Energiedienstleistungsunternehmen (ESCO):** bietet dienstleistungsbasierte Angebote für Energie an, z. B. Wärmecontracting, Effizienzcontracting, Wärme als Dienstleistung, Energie als Dienstleistung usw., können aus verschiedenen Sektoren kommen, darunter Energieversorger, Wärmepumpenhersteller und spezialisierte Start-ups.

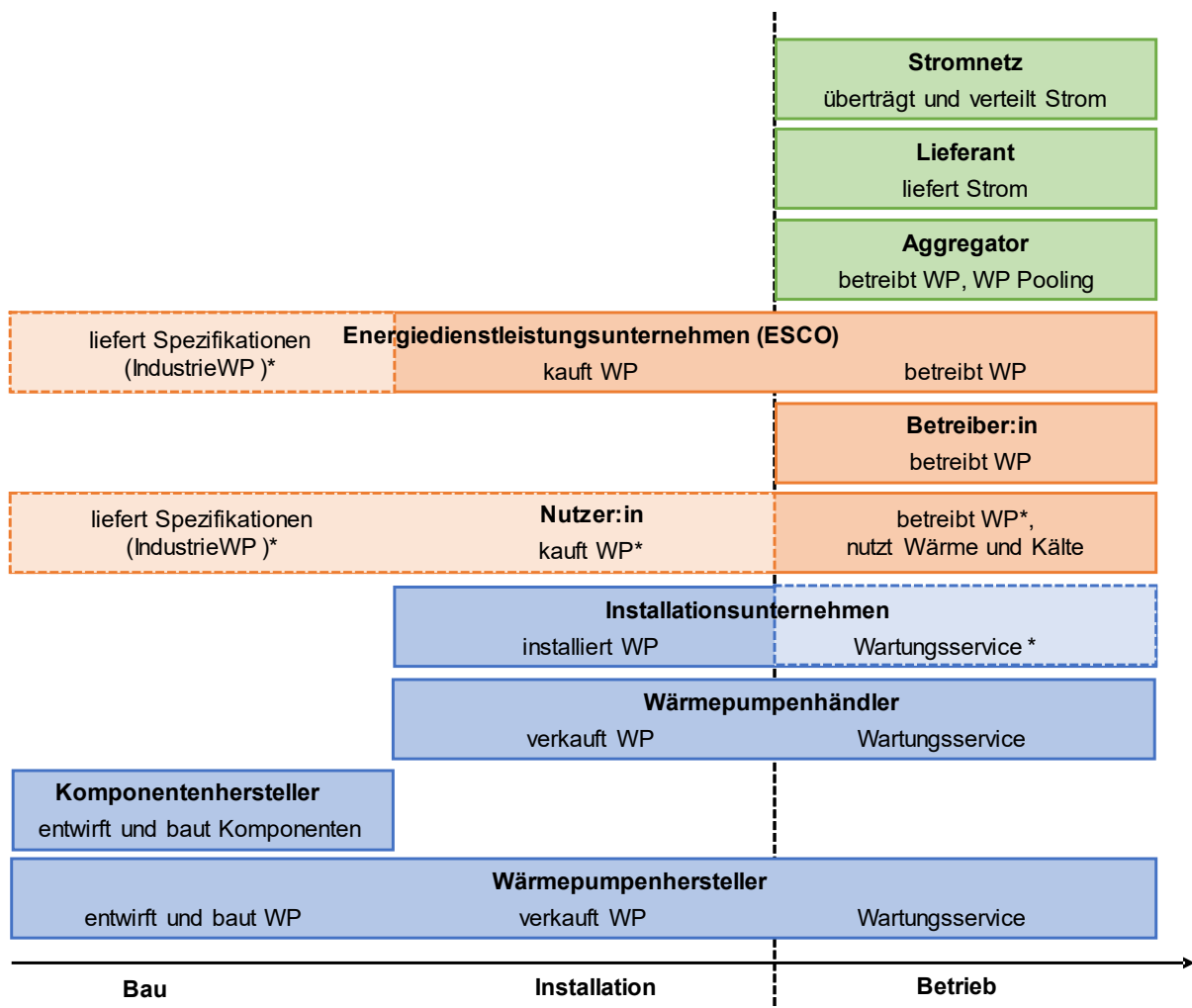


Abbildung 8: Überblick über die Interessensgruppen im Lebenszyklus von IoT-fähigen Wärmepumpen (* kennzeichnet optionale Aufgaben)

Tabelle 1: Interessengruppen- und IoT-Anwendungsmatrix (x = beteiligt, k = kann beteiligt sein)

| Stakeholder:innen | Betriebs- optimierung | Voraus- schauende Wartung | Inbetrieb- nahme | Bereitstellung von Flexibilität | Wärme als Dienstleistung |
|--|--------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| Nutzer und Nutzerin | X | X | X | X | X |
| Betreiber und Betreiberin | X | X | X | X | X |
| WP-Hersteller | X | X | k | X | X |
| WP-Händler | X | X | k | X | X |
| Installationsunternehmen | X | X | k | X | X |
| Aggregator | | | X | X | |
| Stromnetz | | | | X | |
| Lieferant | k | | | X | |
| Energiedienstleistungs- unternehmen | X | X | X | X | X |

Die Betriebsoptimierung umfasst auch die Interaktion mit anderen Energielieferanten (z.B. PV oder andere Wärmeversorger) und den Verbrauchern / Verbraucherinnen (z.B. industrielle Nutzung oder Nutzung im Haushalt) am Standort, an dem die Wärmepumpe betrieben wird, sowie die Integration in übergeordnete Systeme (Gebäudeenergiemanagement oder industrielles Prozessleitsystem). Diese Interaktionen liegen in der Verantwortung derjenigen, der die Wärmepumpe betreibt (Nutzer und Nutzerinnen oder Betreiber:innen oder Energiedienstleistungsunternehmen).

An der Optimierung des Wärmepumpenbetriebs, der Inbetriebnahme und der vorausschauenden Wartung sind die traditionellen Akteur:innen im Wärmepumpensektor beteiligt: Nutzer und Nutzerinnen, sowie Unternehmen, die Wärmepumpen herstellen, damit handeln und sie installieren. Es gibt hier keinen Unterschied zwischen privaten und industriellen Anwendungen von Wärmepumpen. Im Gegensatz dazu sind an der Bereitstellung von Flexibilität wesentlich mehr Unternehmen beteiligt, die Teil des Energiesystem sind. Aggregatoren werden vor allem für kleine Wärmepumpen in Privathaushalten benötigt, Wärmepumpen mit größeren Kapazitäten können auch ohne Aggregatoren Netzdienstleistungen erbringen. Wärme als Dienstleistung (Contracting, Heat as a service) wird von ESCO angeboten und basiert auf einem alternativen Eigentumsmodell für die Wärmepumpen.

Die wesentlichen Vorteile für Nutzer und Nutzerinnen von IoT-fähigen Wärmepumpen sind niedrigere Kosten, effizientere Heizsysteme und eine höhere Zuverlässigkeit. Für die Wärmepumpen-Wertschöpfungskette (Unternehmen, die Komponenten für Wärmepumpen herstellen, die Wärmepumpen herstellen, mit ihnen handeln und sie installieren) führt die Digitalisierung zu neuen Produkten und Dienstleistungen, die Wärmepumpen attraktiver und zukunftssicherer machen. Im Vergleich zu traditionellen Geschäftsmodellen haben sie mehr Verantwortung für die Effizienz der

IoT-fähigen Wärmepumpensysteme. Das Energiesystem (Aggregatoren, Lieferanten, Stromnetz usw.) hat einen hohen Bedarf an Flexibilitätsbereitstellung, um schwankende erneuerbare Erzeugung auszugleichen. Wärmepumpen ermöglichen Sektorkopplung, indem sie den Wärme- und den Stromsektor miteinander verbinden und Flexibilität auf verschiedenen Ebenen bieten, was für die Zukunft besonders relevant sein wird. Energiedienstleistungsunternehmen (ESCO) sind ein neuer Akteur im Gebäudesektor, haben sich aber bereits im industriellen Contracting etabliert. Sie helfen bei der Verbreitung von Wärmepumpen, da ihre Dienstleistung die Beteiligung der Nutzer und Nutzerinnen reduziert.

Der vollständige Bericht über Geschäftsmodelle ist verfügbar unter <https://heatpumpingtechnologies.org/annex56/> (IEA HPT Annex 53, 2023)

6.7. Geschäftsmodelle für digitale Technologien in Fernwärmenetzen in Österreich sowie rechtliche/ regulative Randbedingungen

Dieser Beitrag wurde koordiniert und verfasst von: Ingo Leusbrock, AEE Intec, basierend auf den Ergebnissen des nationalen Abschluss-Workshops

6.7.1. Übersicht

Am 13.12.2023 fand online ein nationaler Workshop im Rahmen des IEA DHC TS4 mit dem Titel „Digitalisierung der Fernwärme“ statt (siehe auch Abschnitt 7.3). Hintergrund dieses Workshops war der Abschluss des internationalen Projektes und damit der möglich gewordene Wissenstransfer aus der internationalen Community für die österreichischen Zielgruppen wie u.a. Fernwärmebetreiber, Planerinnen und Planer und öffentliche Körperschaften.

Beim Format wurde nicht nur Wert auf Know-How Transfer gelegt, sondern auch die Teilnehmer und Teilnehmerinnen aktiv für weiteren Input und Feedback in das Programm eingebunden. So gab es neben inhaltlichen Präsentationen im zweiten Teil des Workshops sowohl eine mehrstufige Mentimeter-Umfrage als drei verschiedene thematische Breakout-Sessions. Dieser zweite Teil befasste sich primär mit Geschäftsmodellen für digitale Technologien in Fernwärmenetzen in Österreich sowie rechtliche/ regulative Randbedingungen in diesem Kontext. Die konkret adressierten Themen in den Breakout-Sessions umfassten technische Aspekte, neue Geschäftsmodelle und regulatorische Aspekte und Rahmenbedingungen.

Insgesamt haben bis zu 68 Teilnehmer und Teilnehmerinnen an dem Workshop teilgenommen. Die hohe Zahl unterstreicht die aktuelle Wichtigkeit des Themas und den Austausch über / Interesse an internationalen Erfahrungen im Fernwärmebereich in Österreich, wie sie durch IEA-Projekte ermöglicht werden.

Die Folien des gesamten Workshops sind [hier](#) zu finden.

6.7.2. Inhaltliche Zusammenfassung des interaktiven Teils und der Gruppendiskussionen

Der interaktive Teil wurde durch einen Impulsvortrag zum Thema eingeleitet und begleitet von einer Mentimeter-Umfrage. Die Mentimeter-Umfrage drehte sich um die Chancen und Potentiale sowie auch die Probleme und Hemmnisse für digitale Geschäftsmodelle in der Nah- und Fernwärme. Bei Chancen und Potentiale (siehe Abbildung 9) wurde primär die Betriebsoptimierung als naheliegendste Anwendung gesehen. Bei den Problemen und Hemmnisse (siehe Abbildung 10) wurde das fehlende Knowhow für eine allgemeine Anwendung moderner digitaler Methoden als kritisch gesehen.

Chancen und Potentiale für digitale DHC-Geschäftsmodelle

27 responses



Abbildung 9: Screenshot Mentimeter-Umfrage "Chancen und Potentiale für digitale DHC-Geschäftsmodelle"

Probleme und Hemmnisse für digitale DHC-Geschäftsmodelle

29 responses



Abbildung 10: Screenshot Mentimeter-Umfrage "Probleme und Hemmnisse für digitale DHC-Geschäftsmodelle"

Die jeweiligen Breakout-Sessions zu den Themen a) technische Aspekte (siehe Abbildung 11), b) neue Geschäftsmodelle (siehe Abbildung 12), und c) regulatorische Aspekte und Rahmenbedingungen (siehe Abbildung 13) wurden mit einem Miro-Board jeweils unterstützt zur Erfassung der Inputs der jeweiligen Session-Teilnehmer und Teilnehmerinnen.

Bei den **technischen Aspekten** wurde folgende Punkte angemerkt:

- Chancen und Möglichkeiten
 - Dimensionierung von Hausübergabestationen überprüfen
 - Identifikation von auffälligen Hausübergabestationen
 - Zielnetzplanung
 - Etablierte Netz- und Datenstruktur erlaubt neue Services
- Herausforderungen und Hindernisse
 - Datenaufbereitung und GIS-Daten
 - Schlechte Datenlagen, geringe Datenqualität bzw. teilweise hohe Datenausfallraten
- Was wird gebraucht?
 - Schnittstellen
 - Dateninfrastruktur

Bei den **Neuen Geschäftsmodellen** wurden folgende Punkte angemerkt:

- Chancen und Möglichkeiten
 - Teilnahme mit einzelnen dezentralen Erzeugungsanlagen an Wärmemärkten
 - FW-Betreiber übernimmt Übergabestationen
- Herausforderungen und Hindernisse
 - Rechtlicher Rahmen
 - Große Betriebe ggf. Unflexibel
 - Interaktion mit dem Kunden oder der Kundin erforderlich
 - Nutzen für Endkunden und Endkundinnen nicht immer klar
 - Rechtliche Rahmenbedingungen zu strikt teilweise
- Was wird gebraucht?
 - Neue Vertragsformen
 - Definition Mehrwert für Verbraucher und Verbraucherinnen
 - Bonus – Malus -Systeme

Bei den **Regulatorischen Aspekten** wurde folgende Punkte angemerkt:

- Chancen und Möglichkeiten
 - Ausschöpfen aller Wärmepotentiale, temporär und lokal
- Herausforderungen und Hindernisse
 - DSGVO
 - Datenfragmentierung bei verschiedenen Stakeholdern
 - Eigenverhältnisse unklar: wem gehört die Übergabestation?
 - Dritte haben keinen Anspruch auf Einspeisung
 - Regeln für KI
 - Transparenz und Erklärbarkeit
 - Sehr unterschiedliche Vertragsstrukturen
- Was wird gebraucht?
 - Wärmenetz EEG
 - Die Leute persönlich ansprechen
 - Rechtliche Rahmen für Wärmemärkte in verschiedenen Eigentumsverhältnissen erlauben
 - Klare Regelung für Datenverwendung

Diese Inputs lieferten interessante Einsichten aus der Branche und von Anwenderinnen und Anwendern, wie die Digitalisierung in der Fernwärme stattfinden kann, wo es noch technischen Entwicklungsbedarf gibt und welche Rahmenbedingungen verbessert gehören, um das Potential der Digitalisierung in der Fernwärme zu heben.



Abbildung 11: Screenshot Miro-Board "Technische Aspekte"

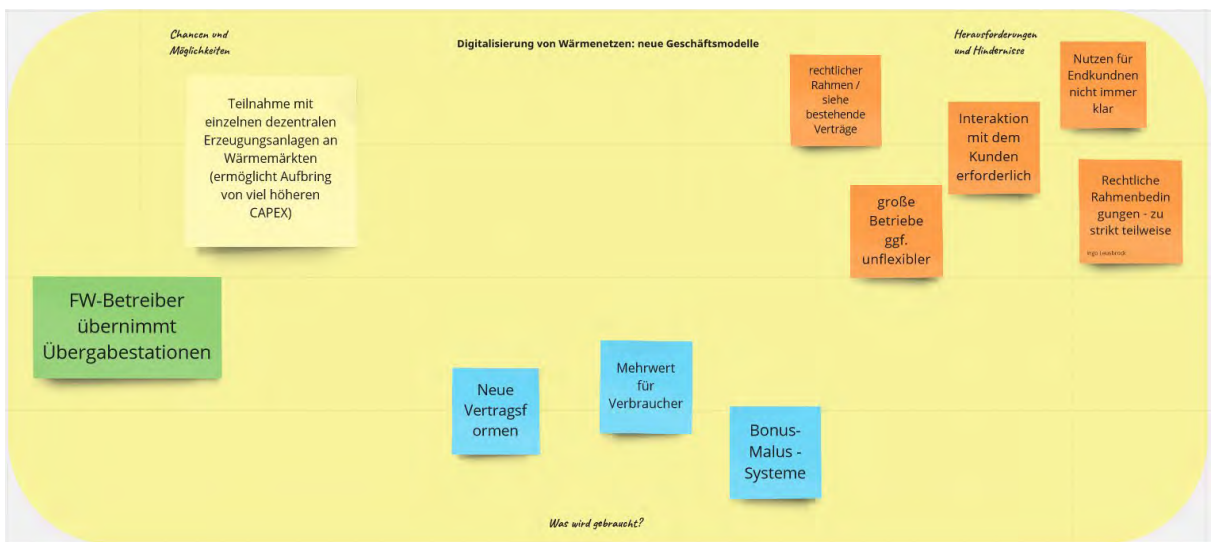


Abbildung 12: Screenshot Miro-Board "Neue Geschäftsmodelle"



Abbildung 13: Screenshot Miro-Board "Regulatorische Aspekte und Rahmenbedingungen"

7 Vernetzung und Ergebnistransfer

Im Rahmen des IEA DHC Annex TS4 wurden diverse Veranstaltungen und Publikationen durchgeführt:

7.1. Webinare und Veranstaltungen des Annex TS4

1. Webinar: “Digitalisation of District Heating”, 2. April 2020, www.youtube.com/watch?v=SkztGI9mfhM&
2. Webinar: “Digitalization for optimizing integrated district heating systems”, 9. September 2020, zusammen mit IEA DHC Annex TS3 “Hybrid Energy Networks“; https://www.iea-dhc.org/fileadmin/documents/Annex_TS4/20200909_Proceedings_IEA_DHC_Annex_TS3_TS4_Industry_Workshop.pdf
3. Webinar: “Digitalization for optimizing integrated district heating systems”, 3. November 2021, zusammen mit IEA DHC Annex TS3 “Hybrid Energy Networks“; https://www.iea-dhc.org/fileadmin/documents/Annex_TS4/20211103_Proceedings_IEA_DHC_Annex_TS3_TS4_Industry_Workshop_final.pdf
4. Webinar: Testbeds for Digitalization Solution in District Heating, 27. April 2022; https://www.iea-dhc.org/fileadmin/documents/Annex_TS4/20220427_Proceedings_IEA_DHC_Annex_TS4_Testbeds_webinar.pdf
5. Abschluss-Konferenz: Digitalization as the Enabler for High Performance District Heating Systems; 20. Bis 21. November 2023; https://www.iea-dhc.org/fileadmin/documents/Annex_TS4/20231121_IEA_DHC_Annex_TS4_Conference_Proceedings.pdf
6. Video-Zusammenfassung: Digitalisation of District Heating: Summary of findings from IEA DHC Annex TS4: https://www.youtube.com/watch?v=3nsb7eT_VEo

7.2. Vorträge und Präsentationen in direkten Zusammenhang mit dem Annex TS4

1. Schmidt, D., Tunzi, M., Widl, E., Gölles, M. & Vanhoudt, D. (2022). Digitalisation in District Heating Supply – with Data to Optimised Systems and new Business Opportunities. In: 8th International Conference on Smart Energy Systems September 13-14, 2022 /Aalborg, Denmark
2. Schmidt, D. & Gölles, M. (2023). Digitalisation as the Basis for Efficient and Flexible District Heating Systems. In: 9th International Conference on Smart Energy Systems September 12-13, 2023 / Copenhagen, Denmark

3. Schmidt, D., Tunzi, M., Widl, E., Blesl, M. & Vanhoudt, D. (2023). Digitalisation in District Heating Supply – with Data to Optimised Systems and new Business Opportunities. In: 18th International Symposium on District Heating and Cooling, DHC2023, 03–06 September 2023, Beijing, China
4. Widl, E., Sporr, A., Mairhofer, M., Natiesta, T., Marx, N., & Schmidt, R.-R. (2022). Prototype of an open testbed for the lab validation of smart applications of district heating substations. 2022 10th Workshop on Modelling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES), 1–6. <https://doi.org/10.1109/MSCPES55116.2022.9770173>

7.3. Der nationale Abschlussworkshop

Die wesentlichen Ergebnisse der österreichischen Beteiligung wurden im Rahmen eines nationalen Abschlussworkshops mit dem Titel „*IEA DHC Annex TS4, Digitalisierung der Fernwärme*“ am 13.12.2023 verbreitet. Dieser inkludierte Präsentationen aus der Industrie (*Wien Energie, Danfoss Österreich, Arteria Technologies GmbH*) und dem nationalen Projektteam. Bis zu 68 Teilnehmer und Teilnehmerinnen, hauptsächlich aus Österreich und Deutschland waren beteiligt. Die Inhalte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Einführung und Willkommen, Überblick: Der IEA DHC Annex TS4: Vorstellung des Guidebooks und der internationalen Kooperation (Ralf-Roman Schmidt, AIT)
- Digitale Zwillinge in der Fernwärme (Edmund Widl, AIT)
- Betriebsoptimierung von Fernwärmenetzen mit Hilfe digitaler Zwillinge (Ines Lindmeier, Wien Energie)
- Digitalisierungs-Lösungen von Danfoss (Peter Ott, Danfoss Österreich)
- Herausforderungen und Lösungen im Betrieb: optimierungsbasierte vorausschauende Einsatzsteuerung von Erzeugungseinheiten und steuerbaren Verbrauchern (Markus Gölles, BEST)
- Planung und Betrieb von Fernwärmenetzen mit der Arteria Platform (Stefano Coss, Arteria Technologies GmbH)
- Workshop / Gruppendiskussion: Geschäftsmodelle für digitale Technologien in Fernwärmenetzen in Österreich sowie rechtliche/ regulative Randbedingungen (siehe Abschnitt 6.7)

Die Unterlagen können hier heruntergeladen werden: https://www.iea-dhc.org/fileadmin/documents/Annex_TS4/20231213_Abschluss_IEA_DHC_Annex_TS4_Austria.pdf



Abbildung 14: Screenshot ausgewählter Teilnehmer und Teilnehmerinnen des nationalen abschluss-Workshops

7.4. Nutzung der Inhalte in Vorträgen, Veröffentlichungen und Vorlesungen

1. Markus Göllles: „Herausforderungen und Lösungen im Betrieb: Optimierungsbasierte vorausschauende Einsatzsteuerung von Erzeugungseinheiten und steuerbaren Verbrauchern“ beim Kraftwerktechnischen Kolloquium 2023. Von diesem Vortrag ist auch eine Videoaufzeichnung verfügbar, siehe <https://kwtk.zummit.com/events/55.-kraftwerkstechnisches-kolloquium/10733/326TR/program/talk/herausforderungen-und-loesungen-im-betrieb--optimierungsbasierte-vorausschauende-einsatzsteuerung-von-erzeugungseinheiten-und-steuerbaren-verbrauchern/94081/infos>
2. Markus Göllles, Astrid Leitner, Christine Mair, Andreas Moser, Daniel Muschick, Valentin Kaisermayer, Mathias Schwendt und Daria Shabatska: Konferenzbeitrag zu „Herausforderungen und Lösungen im Betrieb: Optimierungsbasierte vorausschauende Einsatzsteuerung von Erzeugungseinheiten und steuerbaren Verbrauchern“, <https://www.die-taktiker.de/epub/Kraftwerkstechnik%202023.pdf> (S. 517)
3. Integration zentraler Erkenntnisse zur Digitalisierung von Wärmenetzen in die Unterlagen der LV *Energiespeicherung und -verteilung* (2. Semester Masterstudium Regenerative Energiesysteme und technisches Energiemanagement, FH Wr. Neustadt, Campus Wieselburg) + Verweis auf das TS4-Guidebook als umfassendes Kompendium

7.5. Das internationale Guidebook

Die wichtigste Dissiminierungsaktivität ist die Veröffentlichung des IEA DHC TS4 Guidebooks. Das Guidebook kann unter <https://www.iea-dhc.org/the-research/annexes/2018-2024-annex-ts4> heruntergeladen werden. Die Nachricht der Veröffentlichung wurde auch über Social Media (LinkedIn und Twitter) von mehreren Ko-Autoren verbreitet.

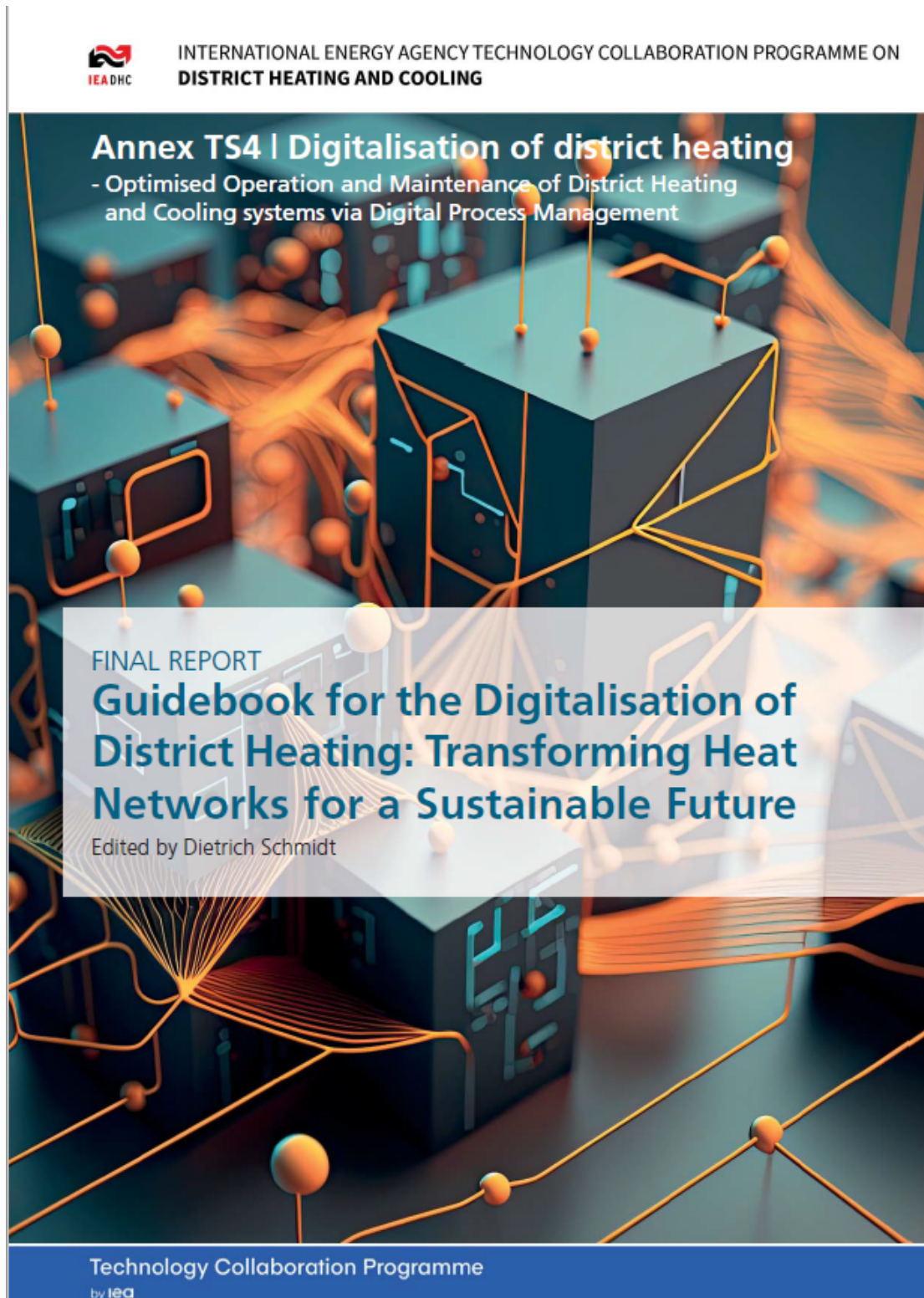


Abbildung 15: Titelseite des IEA DHC TS4 Guidebook

8 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

8.1. Schlussfolgerungen

Das Potenzial von Digitalisierungslösungen im Bereich der Wärme- und Kältenetze ist erheblich. Dieses kann aber nur gehoben werden, wenn

- eine entsprechende anlagentechnische und sensorische Ausstattung gegeben ist
- regulatorische Rahmenbedingungen geschaffen werden und
- geeignete Geschäftsmodelle entwickelt werden.

Der Ausbau der Wärmenetze und die Integration weiterer erneuerbarer Energiequellen (vor allem Solarthermie, Geothermie sowie Umgebungs- und Abwärme) und zusätzlicher thermischer Speicher sollte im Gleichschritt mit einer Erhöhung des Digitalisierungsgrades erfolgen. Fortgeschrittene regelungstechnische Ansätze ermöglichen es, bestehende Anlagen im Zusammenspiel mit anderen Elementen des Netzes auf neuartige und effizientere Weise zu betreiben. Auch die datengestützte Analyse des Netzes erlaubt es oft, Schwachstellen zu erkennen und auf einfache Weise Verbesserungen zu erreichen.

In diesem Zusammenhang spielen Digitale Zwillinge eine besondere Rolle, indem sie Echtzeitdienste bereitstellen, die entweder Betreiber:innen unterstützen oder Prozesse automatisieren können. Durch die Integration fernsteuerbarer Anlagen wird die bidirektionale, (halb-)automatisierte Interaktion mit dem FWK-System sowie der Übergang von traditionellen passiven Netzwerken zu intelligenten Energiesystemen ermöglicht. Dies eröffnet neue Möglichkeiten zur Unterstützung und/oder Automatisierung bestimmter Aspekte des Betriebs und der Wartung von FWK-Netzen und der zugehörigen Infrastruktur, insbesondere für Überwachung, Diagnose und Fehlererkennung, Prognose und Betriebsoptimierung.

Um die Vorteile der Digitalisierung nutzen zu können, sollte die Aus- und Nachrüstung von FWK-Netzen mit den Grundelementen der Digitalisierung (Sensoren, Schnittstellen, lokale SPS-Systeme, ...) auch dann erfolgen, wenn der unmittelbare Nutzen nicht offensichtlich ist. In vielen Fällen wird er sich im weiteren Verlauf (etwa dem Ausbau des Netzes, der Integrationen weiterer Wärmequellen oder dem Zusammenschluss mehrerer Netze) noch zeigen. Für solche betriebswirtschaftlich schwer zu argumentierenden, langfristig technisch, aber sinnvollen Investitionen müssen natürlich entsprechende Anreize gesetzt werden, sei es durch Förderungen oder durch Vorschriften für besseres Monitoring.

Herausforderungen zur Implementierung von Geschäftsmodellen für die beschriebenen Digitalisierungslösungen können umfassen, mögliche Inflexibilität großer Betriebe, die konkrete Kundeninteraktion, unklaren Nutzen für Endkunden und Endkundinnen und zu strikte rechtliche Rahmenbedingungen. Lösungen erfordern neue Vertragsformen, die Definition von Mehrwert für Verbraucher und Verbraucherinnen und Bonus-Malus-Systeme.

Herausforderungen auf der regulatorischen Seite inkludieren Aspekte wie die DSGVO, Datenfragmentierung, unklare Eigenverhältnisse, fehlende Ansprüche Dritter auf Einspeisung,

Regelungen für KI und Transparenz. Als Lösungen werden genannt: Regelung über z.B. ein „Wärmenetz EEG“, eine bessere persönliche Ansprache der Bevölkerung, klare rechtliche Rahmenbedingungen für Wärmemärkte und klare Regelungen zur Datenverwendung.

8.2. Weiterführende Aktivitäten

Forschungsprojekte im Bereich der Wärme- und Kältenetze, die angesichts vieler Herausforderungen der Energiewende auch weiterhin notwendig sein werden, sollten stets auch den Digitalisierungsaspekt berücksichtigen bzw. hierauf einen gesonderten Fokus legen. Die Entwicklung attraktiver Geschäftsmodelle wird ebenfalls wesentlich sein, um den Anteil der netzgestützten Wärme- und Kälteversorgung weiter zu erhöhen. In diesem Sinne werden Erkenntnisse aus Annex TS4 in weiterführende F&E-Projekte einfließen, wie einige z.B. schon in der Ausschreibung *Energieforschung 2023* beantragt wurden.

Des Weiteren sind hier zwei konkrete Folgeaktivitäten im Zuge des IEA DHC TCPs zu erwähnen:

- **IEA DHC Annex TS8: Experimentelle Erforschung von Fernwärme- und Fernkältesystemen.** Der Annex TS8 baut auf die Ergebnisse des TS4 auf und fokussiert auf experimentelle Untersuchungen der Fernwärme und -kälte. Der Annex TS8 legt einen starken Fokus auf die Integration digitaler Technologien, sowohl hinsichtlich der Fragestellungen bzgl. IoT und Cloud-Lösungen, Digital Twins, Machine Learning) als auch der experimentellen Durchführung (z.B. Hardware-in-the-Loop, Data Spaces). Für die Beteiligung an dem Annex wurde eine nationale Finanzierung bis Ende 2026 bewilligt⁸.
- **IEA DHC Annex TS9: „Digitalization of District Heating and Cooling: - Improving Efficiency and Performance Through Data Integration“.** Der Annex TS9 ist ein direkter Nachfolger des Annex TS4. Ein großer Fokus des TS9 ist das Thema „Data spaces“, das für den Bereich Fernwärme weiter untersucht werden soll. Weiters werden neue Themen aufgegriffen, wie z.B: robuste digitale Infrastruktur, Datenintegration sowie Benutzer:innen-Interaktion, aber auch Themen des TS4 fortgeführt (Case Studies sowie Geschäftsmodelle). Für die Beteiligung an dem Annex wurde eine nationale Finanzierung bis Ende 2028 ausgeschrieben⁹.

8.3. Empfehlungen für die österreichische FTI-Politik

Wärme- und Kältenetze sind bereits heute ein wichtiges Element unseres Energiesystems und im Einklang mit den EU-Strategien sollte ihr weiterer Ausbau angestrebt werden, wobei zugleich der Anteil an erneuerbarer Energie sukzessive erhöht werden muss, bis zu einer vollständigen Dekarbonisierung 2040. Digitalisierung kann dabei an verschiedenen Stellen unterstützen und in manchen Fällen neue Lösungen überhaupt erst ermöglichen. Dabei sollten speziell folgende Maßnahmen durch Bewusstseinsbildung, Förderungen, passende F&E-Programme unterstützt und ggf. durch gesetzliche Vorschriften forciert werden:

- Die Erstellung von Metadatenkatalogen bei relevanten Daten, der die Nachvollziehbarkeit der Inhalte, Qualität und die Identifikation der Inhalte ermöglicht. „Eindeutige“ Beschreibungen der Attribute und Führung von eindeutigen Kennungen (Identifier)

⁸ <https://projekte.ffg.at/projekt/4955864>

⁹ <https://www.ffg.at/iea/AS2024>

ermöglichen die Verknüpfung der Daten. Auch das Auffinden von Daten wird wesentlich erleichtert.

- Die Erfassung von Daten zum Gebäudebestand, inklusive 3D Geometrien, Heizsysteme, Gebäudezustände, Materialien sowie Monitoringdaten des Energiebedarfs und Nutzungsprofile. Die Erfassung ermöglicht eine ganzheitliche Sichtweise auf die Gebäude und eine optimierte Integration von Digitalisierungslösungen.
- Die Entwicklung und Implementierung von Algorithmen und Funktionalitäten zur Anonymisierung sowie Zugriffsberechtigung von Daten. Dieses inkludiert die Definition und Beschreibung standardisierter APIs, um einen verlustfreien Datenaustausch für unterschiedliche Anwendungen zu garantieren und die (Weiter-) Entwicklung von Dashboards und Analysetools zur Aufbereitung und Visualisierung der relevanten Daten.
- Verbesserung der Monitoring-Möglichkeiten durch Installation zusätzlicher Sensoren und smarterer Zähler in Fernwärme- und Fernkältenetzen, um Echtzeitdaten über die Durchflussmengen, die Temperaturen und damit den Energieverbrauch zu erhalten. Dies liefert ein besseres Verständnis der Leistung des Systems und hilft bei der Identifizierung von Bereichen mit Verbesserungsbedarf. Dafür sollten im Neu- und Ausbau der Netze entsprechende Anreize gesetzt werden, etwa bessere Förderquoten bei Erreichen eines vorgegebenen Digitalisierungsniveaus.
- Verbesserung der Datenanalyse durch Soft-Sensoren (Sensor Fusion) für schwer zugängliche Größen, Zustandsschätzungen, Algorithmen für maschinelles Lernen und Vorhersagemodelle, um die gesammelten Daten zu analysieren und Muster und Trends ablesen sowie Anomalien erkennen zu können. Dies ermöglicht eine genauere Vorhersage des Energiebedarfs und eine effizientere Nutzung der Ressourcen. Zudem lassen sich auf diese Weise Maßnahmen der *Predictive Maintenance* umsetzen, wodurch Wartungsaufwand und -kosten sinken.
- Verbesserung der Regelung einerseits durch fortschrittliche Einzelregelungen (jenseits von PID-Reglern und regelbasierten Zugängen), andererseits durch moderne übergeordnete Regelungsstrategien wie modellprädiktiver Regelung (Model-Predictive Control, MPC). Diese erlauben es, den Energieverbrauch zu minimieren und die Nutzung erneuerbarer Energien zu maximieren, was zu einer höheren Effizienz und niedrigeren Kosten führt.
- Die Leistungsfähigkeit modellprädiktiver Regelung steigt mit den verfügbaren Energiespeichern. Deren Einsatz erlaubt es oft, ungünstigen Betriebszuständen auszuweichen. Entsprechend sollte die Nachrüstung von Wärmenetzen mit thermischen Speichern gefördert werden. Um das Zusammenspiel mit digitalen Lösungen wirksam zu gestalten, sollten die Speicher stets mit angemessener Sensorik ausgestattet werden. Ein besonderer Fokus sollte in Zukunft auf saisonale Speicher (Tiefensonden, Kavernenspeicher, Aquiferspeicher, Grubenspeicher, Eisspeicher für Kühlnetze) gelegt werden.
- Es sollten Anreize zur Verbesserung der Interoperabilität der Netze gesetzt werden, indem möglichst Standardkommunikationsprotokolle wie OPC UA oder BACnet zum Einsatz kommen, um den Informationsaustausch zwischen verschiedenen Komponenten und Systemen zu erleichtern. Das begünstigt auch die Integration dezentraler Lösungen und die Kombination mehrerer Wärmenetze.
- Förderung der Nachfragesteuerung (Demand Side Management, DSM) durch Anreize für die Nutzer und Nutzerinnen zur Teilnahme an entsprechenden Programmen. Dabei kann vor allem die thermische Trägheit der Gebäude ausgenutzt werden, um den Energieverbrauch in

Spitzenzeiten zu senken und den Anteil erneuerbarer Energien im Netz zu erhöhen. Ebenso sollten Maßnahmen zur Reduktion der Systemtemperaturen im Gebäude gefördert werden.

- Förderung sektorenübergreifender Lösungen, insbesondere durch das Berücksichtigen zeitabhängiger Strompreise bei Wärmepumpen, optimierten Einsatz von Biomasse-KWK-Anlagen und die Nutzung der Abwärme von Elementen der Sektorenkopplung (Elektrolyseure, Metanisierungs- bzw. Methanolisierungsanlagen) in Wärmenetzen.

Literaturverzeichnis

- Annex 56 (2023, 17. October). Annex 56. <https://heatpumpingtechnologies.org/annex56/>
- Aschbacher, A. (2013). Blue Globe Report – Smart Energies 6/2013. <https://www.klimafonds.gv.at/wp-content/uploads/sites/16/BGR0062013SEneueEnergien2020.pdf>
- Averfalk, H. et al. (2021). Low-Temperature District Heating Implementation Guidebook. IEA DHC Report, 2021, <https://www.iea-dhc.org/the-research/annexes/2017-2021-annex-ts2>
- Bemporad, A. & Morari, M. (1999). Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints. *Automatica*, 35(3), 407–427. [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(98\)00178-2](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(98)00178-2)
- Carrion, M. & Arroyo, J. M. (2006). A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem. *IEEE Transactions on Power Systems* 21(3), 1371–1378. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.876672>
- Cearley, D., Burke, B., & Walker, M. (2017). Top 10 Strategic Technology Trends For 2018. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trendsfor-2018>
- Danfoss A/S. (o. J.). Leanheat Production brochure. Abgerufen am 14. February 2023 von <https://www.danfoss.com/en/products/dhs/software-solutions/danfoss-leanheat-software-suite-services/leanheat-production/#tab-documents>
- Decision Trees GmbH. (o. J.). DT.Energy. Abgerufen am 14. February 2023 von <https://www.dtrees.com/en-content/dt-energysuite>
- EMD International A/S. (o. J.). energyPRO. Abgerufen am 10. Februar 2023 von <https://www.emd-international.com/energypro/>
- Fraunhofer IEE. (o. J.). EnergyPilot. Abgerufen am 13. Februar 2023 von <https://www.iee.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/digitales-portfoliomanagement/iee-ems/energypilot.Html>
- Geyer, R., Krail, J., Leitner, B., Schmidt, R.R. & Leoni, P. (2021). Energy-economic assessment of reduced district heating system temperatures, *Smart Energy*, Volume 2, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100011>
- Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>
- Gölles, M., Unterberger, V., Kaisermayer, V., et al. (2021). Supervisory control of large-scale solar thermal systems: IEA SHC FACTSHEET 55.A-D4.1. <http://files.iea-shc.org/public/24m/a-d4-1-supervisory-control-of-large-scale-solar-thermal-systems.pdf>
- Gradyent GmbH. (o. J.). Gradyent. Abgerufen am 10. February 2023 von <https://www.gradyent.ai/>
- Gurobi Optimization, L. (o. J.). Gurobi Optimizer Reference Manual. <https://www.gurobi.com>
- Hu, C., Fan, W., Zeng, E., Hang, Z., Wang, F., Qi, L., & Bhuiyan, M. Z. A. (2022). Digital Twin-Assisted Real-Time Traffic Data Prediction Method for 5G-Enabled Internet of Vehicles. *IEEE*

- Transactions on Industrial Informatics, 18(4), 2811–2819.
<https://doi.org/10.1109/TII.2021.3083596>
- IBM, C. O. (2019). CPLEX User Manual. <https://www.cplex.com>
- IEA (2021), *Net Zero by 2050*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>,
 Licence: CC BY 4.0
- INNIO Jenbacher. (o. J.). myPlant Energy Management. Abgerufen am 22. February 2023,
 from <https://www.jenbacher.com/en/services/myplant-energy-management>
- Jansen, J., Jorissen, F. & Helsen, L. (2023). Optimal control of a fourth generation district heating network using an integrated non-linear model predictive controller. *Applied Thermal Engineering*, 223, 120030. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120030>
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
- Kaisermayer, V., Binder, J., Muschick, D., Beck, G., Rosegger, W., Horn, M., Golles, M., Kelz, J. & Leusbrock, I. (2022). Smart control of interconnected district heating networks on the example of “100 % Renewable District Heating Leibnitz.” *Smart Energy*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100069>
- Kamel Boulos, M. N., & Zhang, P. (2021). Digital Twins: From Personalised Medicine to Precision Public Health. *Journal of Personalized Medicine*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/jpm11080745>
- Leoni, Paolo; Geyer, Roman; Schmidt, Ralf-Roman: Developing innovative business models for reducing return temperatures in district heating systems: Approach and first results, *Energy*, Volume 195, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116963>
- Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., et al. (2014) 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating Smart Thermal Grids into Future Sustainable Energy Systems. *Energy*, 68, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>
- Melesse, T. Y., Di Pasquale, V., & Riemma, S. (2020). Digital Twin Models in Industrial Operations: A Systematic Literature Review. *Procedia Manufacturing*, 42, 267–272. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.084>
- Morales-Espana, G., Latorre, J. M. & Ramos, A. (2013). Tight and compact MILP formulation for the thermal unit commitment problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(4), 4897–4908. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2251373>
- Moretti, L., Manzolini, G. & Martelli, E. (2021). MILP and MINLP models for the optimal scheduling of multi-energy systems accounting for delivery temperature of units, topology and non-isothermal mixing. *Applied Thermal Engineering*, 184, 116161. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116161>
- Moser, A., Kaisermayer, V., Muschick, D., Zemmann, C., Gölles, M., Hofer, A., Brandl, D., Heimrath, R., Mach, T., Tugores, C. R. & Ramschak, T. (2022). Automatic Thermal Model Identification and Distributed Optimisation for Load Shifting in City Quarters. In 2. International Sustainable Energy Conference: ISEC 2022.

<https://graz.pure.elsevier.com/en/activities/automatic-thermal-model-identification-and-distributed-optimisation>

- Moser, A., Muschick, D., Golles, M., Nageler, P., Schranzhofer, H., Mach, T., Ribas Tugores, C., Leusbrock, I., Stark, S., Lackner, F. & Hofer, A. (2020). A MILP-based modular energy management system for urban multi-energy systems: Performance and sensitivity analysis. *Applied Energy*, 261 <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114342>
- Müller A. et al. (2021): T2LowEx Transformation von konventionellen Wärmenetzen in Richtung Niedertemperaturnetze durch sekundärseitige Maßnahmen, Final report 2021; <https://energieforschung.at/projekt/transformation-von-konventionellen-waermenetzen-in-richtung-niedertemperaturnetze-durch-sekundaerseitige-massnahmen/>
- Müller, A.; Binder, J. & Schmidt, R.-R. (2021). Zukunftsfähige Fernwärmenetze durch niedrige Netztemperaturen. *EuroHeat & Power*, 50, 50-55
- Muschick, D., Zlabinger, S., Moser, A., Lichtenegger, K. & Gölles, M. (2022). A multi-layer model of stratified thermal storage for MILP-based energy management systems. *Applied Energy*, 314, 118890. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118890>
- Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective. *IEEE Access*, 8, 21980–22012. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2970143>
- STORM controller. (o. J.). abgerufen am 10. Februar 2023 von https://stormcontroller.eu/en/district-heating-operators?gclid=CjwKCAiA85efBhBbEiwAD7oLQDJt85GKvEpTuCzhtLSL9hegR9DNJ76cAbvJ1w5aQ-ONPDESjUahoCYYcQAvD_BwE
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9–12), 3563–3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
- Widl, E., Sporr, A., Mairhofer, M., Natiesta, T., Marx, N., & Schmidt, R.-R. (2022). Prototype of an open testbed for the lab validation of smart applications of district heating substations. 2022 10th Workshop on Modelling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES), 1–6. <https://doi.org/10.1109/MSCPES55116.2022.9770173>

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: a) Konzept der 1., 2., 3. und 4. Generation der Wärmenetze nach Lund, Werner et al; b) Erweiterung des Konzepts auf die 5. Generation (AIT eigene Darstellung)..... | 13 |
| Abbildung 2: Beispielhafte Konfiguration der Heizanlage eines einfachen Fernwärmenetzes unter Berücksichtigung der Sektorenkopplung durch BHKW und Wärmepumpe. © BEST – Bioenergy and Sustainable Technologies. | 22 |
| Abbildung 3: Schematisches Beispiel eines Digitalen Zwillings für FWK-Systeme..... | 27 |
| Abbildung 4: Von der Arteria-Plattform bereitgestellte Benutzeroberflächen, Beispielimplementierung | 29 |
| Abbildung 5: Schematische Ansicht des Testfalls für den DigitalEnergyTestbed-Prototyp. | 31 |
| Abbildung 6: Implementierung des Testfalls als DigitalEnergyTestbed-Setup unter Verwendung des Digitalen Zwillings des Teststands für die FW-Umformstation als zentrale Komponente..... | 31 |
| Abbildung 7: Links: Der Teufelskreis der hohen Systemtemperaturen (Lock-in), rechts: Der Mehrwert von niedrigen Systemtemperaturen. | 36 |
| Abbildung 7: Überblick über die Interessensgruppen im Lebenszyklus von IoT-fähigen Wärmepumpen (* kennzeichnet optionale Aufgaben) | 39 |
| Abbildung 9: Screenshot Mentimeter-Umfrage "Chancen und Potenziale für digitale DHC-Geschäftsmodelle" | 43 |
| Abbildung 10: Screenshot Mentimeter-Umfrage "Probleme und Hemmnisse für digitale DHC-Geschäftsmodelle" | 44 |
| Abbildung 11: Screenshot Miro-Board "Technische Aspekte"..... | 46 |
| Abbildung 12: Screenshot Miro-Board "Neue Geschäftsmodelle" | 46 |
| Abbildung 13: Screenshot Miro-Board "Regulatorische Aspekte und Rahmenbedingungen" | 46 |
| Abbildung 14: Screenshot ausgewählter Teilnehmer und Teilnehmerinnen des nationalen abschluss-Workshops..... | 49 |
| Abbildung 15: Titelseite des IEA DHC TS4 Guidebook..... | 50 |

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Interessengruppen- und IoT-Anwendungsmatrix (x = beteiligt, k = kann beteiligt sein)40

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------|---|
| DHC | District Heating and Cooling = Fernwärme- und Kälte |
| DSM | Demand Side Management |
| FWK | Fernwärme- und Kälte |
| IoT | Internet of Things |
| IT | Information Technology |
| KI | Künstliche Intelligenz |
| MILP | Mixed Integer Linear Program |
| MPC | Model Predictive Control |

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

+43 800 21 53 59

servicebuero@bmk.gv.at

bmk.gv.at