



# TAGUNGSUNTERLAGEN



## 34. SYMPOSIUM SOLARTHERMIE UND INNOVATIVE WÄRMESYSTEME

14. - 16. Mai 2024  
im Kloster Banz, Bad Staffelstein

# Wärme- und Kältenetze der 5. Generation in der industriellen Energieversorgung – Herausforderungen und Potenziale am Beispiel des incampus

Simon Müller<sup>1</sup>, David Schmitt<sup>1</sup>, Christoph Bott<sup>2</sup>, Rainer Strobel<sup>3</sup>, Markus Faigl<sup>4</sup>  
Peter Bayer<sup>2</sup>, Tobias Schrag<sup>1</sup> und Christoph Trinkl<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für neue Energie-Systeme (InES), Technische Hochschule Ingolstadt (THI), D-85049 Ingolstadt, E-Mail: christoph.trinkl@thi.de, Internet: www.thi.de/go/energie

<sup>2</sup>Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Angewandte Geologie, D-06120 Halle

<sup>3</sup>Planungsgruppe M+M AG, Technische Beratung, D-71034 Böblingen

<sup>4</sup>AUDI AG, Produktionsplanung, D-85057 Ingolstadt

## Zusammenfassung

Dieser Beitrag analysiert die Implementierung und das Betriebskonzept eines innovativen Wärme- und Kältenetzes der fünften Generation am *incampus* in Ingolstadt, das sich durch den Ausgleich von Wärme- und Kältebedarfen innerhalb des Netzes auszeichnet und auf Effizienz sowie CO<sub>2</sub>-Neutralität abzielt. Der Beitrag beleuchtet Herausforderungen wie die Unsicherheit der Arealentwicklung und Potenziale, darunter die Integration von Umweltwärmequellen/-senken und die Nutzung bestehender Infrastruktur als thermische Speicher. Besondere Aufmerksamkeit gilt der Entwicklung von Prosumer-Profilen, der systematischen Planung von Netzwerkkomponenten und der Einbindung saisonaler thermischer Energiespeicher, wobei ein Schwerpunkt auf deren nachhaltiger Integration und der Optimierung der Gesamteffizienz liegt.

## 1 Einleitung und Systembeschreibung

Die dynamische Transformation von Industriearealen, angetrieben durch den globalen Strukturwandel, nimmt eine zentrale Rolle in der urbanen und industriellen Entwicklung ein. Diese Transformation reicht von der Errichtung neuer Industrie- und Gewerbegebiete auf ehemaligen Industriestandorten bis hin zu grundlegenden Umbaumaßnahmen bestehender Industrieparks, beispielsweise in der Automobilindustrie. Ein kritischer Aspekt dieser Entwicklungen ist die zukunftsfähige Gestaltung der Wärme- und Kälteversorgung, die Ingenieure und Projektentwickler vor signifikante Herausforderungen stellt.

Besonders Industriequartiere bieten aufgrund ihrer strukturellen und energetischen Voraussetzungen (z. B. dichte Bebauung, hoher Energiebedarf, verfügbare Abwärmequellen) optimale Bedingungen für den Einsatz von thermischen Netzen. Diese Netze ermöglichen es, Abwärme und diverse lokale, erneuerbare Energiequellen zu integrieren. Sie tragen somit zur Sektorkopplung von Strom und Wärme/Kälte bei. Angesichts der variierenden Energiebedarfe und -verfügbarkeiten spielt die Speicherung thermischer Energie eine wesentliche Rolle. Sensible thermische Energiespeicher erfordert jedoch oft große Speichervolumina, was mit hohem baulichem Aufwand und beträchtlichen Investitionskosten verbunden ist. In vielen zu transformierenden Industriearealen existieren allerdings bereits Infrastrukturen, wie etwa Beckenanlagen und große

Behälter, die als nachhaltige Alternativen zum Neubau dienen und in großskalige, multifunktionale thermische Speicher umgewandelt werden könnten.

Vor einer Betrachtung der Transformation von Industriearealen als wichtige Komponente der urbanen Entwicklung, ist es essenziell, den Begriff und die Technologie der Wärme- und Kältenetze der fünften Generation (5GDHC) zu beleuchten. 5GDHC-Systeme stellen eine innovative Weiterentwicklung in der Gebäudeenergieversorgung dar, die sich durch ihren Betrieb bei Temperaturen nahe der Bodentemperatur auszeichnet. Die niedrigeren Netztemperaturen – im Vergleich zu früheren Wärmenetzgenerationen – reduzieren Wärmeverluste und steigern so die Effizienz. Außerdem erlaubt dieser Ansatz die Nutzung diverser Niedertemperaturwärmequellen [1], wie Umgebungswärme, Geothermie, (Niedertemperatur-)Solarthermie und insbesondere (Niedertemperatur-) Abwärme, was ihn zu einer vielseitigen und nachhaltigen Lösung für moderne Energieanforderungen machen kann. Durch den Einsatz dezentraler Wärmepumpen in Übergabestationen der Abnehmer decken diese Systeme sowohl Heiz- als auch Kühlbedarfe. Charakteristischerweise erfolgen Heizung und Kühlung in 5GDHC-Systemen über dieselbe Infrastruktur.

Das *incampus*-Projekt in Ingolstadt setzt die Prinzipien der 5GDHC-Technologie um und demonstriert, wie durch innovative Planung eine nachhaltige und effiziente Energieversorgung in Industriearealen realisiert werden kann. Das System ist gekennzeichnet durch die Verschiebung von Wärme und Kälte innerhalb eines Netzes und den dynamischen Ausgleich des jeweiligen Bedarfs, die Abwärmenutzung und die Erschließung erneuerbarer Energiequellen (siehe Kapitel 2.2). Mit saisonal schwankenden Betriebstemperaturen zwischen 5 und 30 °C und der Nutzung dezentraler Wärmepumpen zur bedarfsgerechten Temperaturanpassung strebt der Campus nach Energieeffizienz und CO<sub>2</sub>-Neutralität.

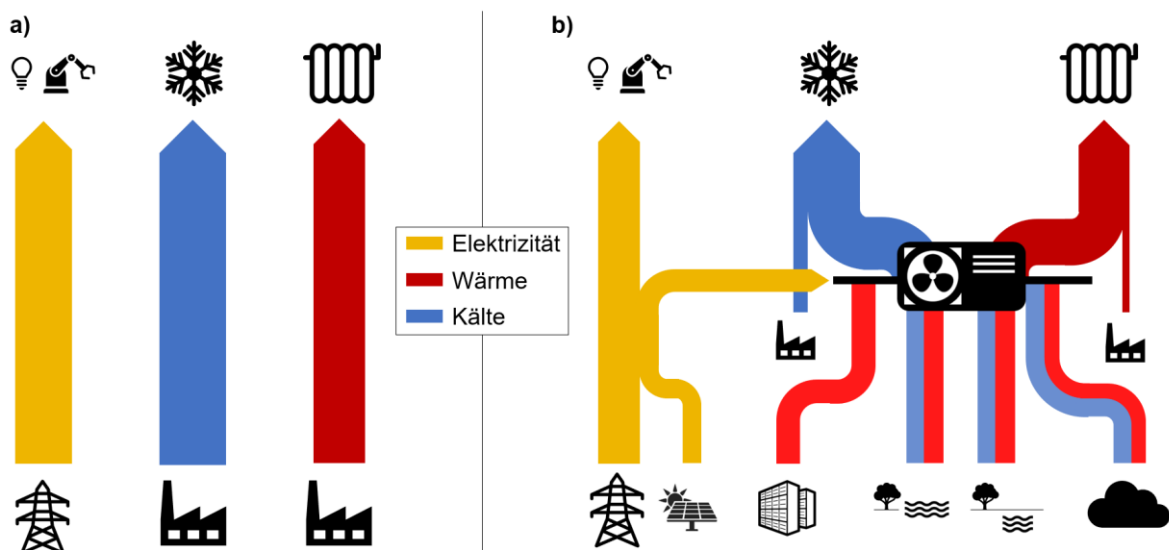
Das *incampus* 5GDHC-Netz ist langfristig für die Versorgung eines 75 Hektar großen Industrieparks für Forschung und Entwicklung ausgelegt (siehe Abbildung 1), der auf einem ehemaligen Raffineriegelände entsteht. Das Netz soll über 9.100 m Rohrleitungen umfassen und in vier Bauphasen schrittweise ausgebaut werden. Im Endausbau soll es bis zu 70 Nicht-Wohngebäude wie Büros, Labore oder Prüfstände miteinander verbinden.



**Abbildung 1.** 3D-Fotomodell des *incampus* Technologieparks (graue Gebäude) [2].

Das Netz vereint die Eigenschaften einer Wärmequelle und -senke sowie eines thermischen Energiespeichers. Als zusätzliche Wärmequelle nutzt das System die Abwärmeleistung eines Rechenzentrums: In der Anfangsphase stehen 1,8 MW Abwärme zur Verfügung und bis zu 4 MW in der Endausbaustufe. Grundwasserbrunnen, die sowohl als Wärmequelle als auch als Wärmesenke dienen können, ergänzen das System mit einer thermischen Leistung von rund 1 MW. Die thermische Nutzung der nahe gelegenen Donau zu Kühl- und Heizzwecken ist ebenfalls möglich. Daneben werden mit Plattenwärmetauschern ausgestattete Löschwasserbehälter als thermische Energiespeicher genutzt. Mit einem Gesamtvolumen von 3.150 m<sup>3</sup> verfügen sie über eine Speicherkapazität von 130 MWh<sub>th</sub> (bei  $\Delta T = 35$  K). Zusätzlich ist der Bau eines saisonalen thermischen Energiespeichers (sTES) unter Nutzung der vorhandenen Beckeninfrastuktur geplant.

Abbildung 2 zeigt den Vergleich eines konventionellen linearen Energiesystems und dem *incampus* Smart Energy System. Das konventionelle lineare Energiesystem (a) ist durch unidirektionale Flüsse und isolierte Energiepfade (für Elektrizität, Wärme und Kälte) gekennzeichnet und weist keine Integration zwischen verschiedenen Energiearten auf. Das *incampus*-Energiesystem (b) hebt die zentrale Rolle des 5GDHC-Netzes und der dezentralen Wärmepumpen hervor, welche den dynamischen und interaktiven Energieaustausch ermöglichen. Die Abbildung zeigt auch die erhöhte Flexibilität des Systems mittels Integration verschiedener Wärmequellen und -senken (wie Abwärme aus dem Rechenzentrum, Flusswasser, Grundwasser oder Umgebungsluft).



**Abbildung 2.** Konzeptionelle Gegenüberstellung eines konventionellen linearen Energiesystems (a) und dem *incampus* Smart Energy System (b) (in Anlehnung an [3]).

## 2 Herausforderungen und Potenziale der Planung

Die Implementierung des 5GDHC-Systems am *incampus* bringt spezifische Herausforderungen mit sich, insbesondere im Umgang mit Unsicherheiten bezüglich der Entwicklung der Gebäudeanzahl und -nutzung auf dem Industrieareal. Diese Situation erfordert eine flexible Planung für das schrittweise expandierende Energiesystem und die ausschließlich Nicht-Wohngebäude umfassende Nutzerstruktur. Gleichzeitig bietet das System beträchtliche Potenziale: Das niedrige Temperaturniveau erlaubt die Integration verschiedener Umweltwärmequellen und -senken, wodurch sich die Flexibilität erhöht. Auch die Möglichkeit der Nutzung bestehender Infrastruktur für saisonale thermische Energiespeicher stellt ein besonderes Potenzial dar.

Nachfolgend werden diese Aspekte aufgegriffen und die Herangehensweise in der Planungsphase beschrieben: Beginnend mit einem systematischen Ansatz zur Entwicklung von Prosumer-Profilen, über die Einbindung verschiedener Umweltwärmequellen und -senken, die Analyse der Rohrdimensionierung, bis hin zur Integration thermischer Speicher.

### 2.1 Strukturierter Ansatz zur Entwicklung von Prosumer-Profilen

Die Abschätzung von Energiebedarfen und der Erstellung von Lastprofilen für das Industriegebiet ist entscheidend für die Planung und den effizienten Betrieb des Energiesystems. Im Zentrum steht die strukturierte Entwicklung dieser Profile, welche durch die Besonderheit des 5GDHC-Systems, bei dem Gebäude sowohl als Wärmeerzeuger als auch -verbraucher (Prosumer) agieren, komplex ist. Die Betrachtung der Wärme- und Kältebedarfe erfolgt daher nicht isoliert, sondern integriert, indem die dualen Funktionen der Gebäude berücksichtigt werden.

#### 1. Definition von Archetypen („Energetische Blaupause“)

Der Prozess beginnt mit der „Energetischen Blaupause“, bei der verschiedene energetische Archetypen für Gebäude auf dem *incampus* identifiziert wurden. In diese Archetypen werden Schlüsselmerkmale, wie spezifische Heizprofile und Kühlanforderungen, integriert. Für den *incampus* wurden zwei primäre Archetypen festgelegt: einer für Werkstatt/Prüfstandanlagen und ein weiterer für Bürogebäude. Diese Archetypen, die das Spektrum der Gebäudetypen im Industriegebiet widerspiegeln, liefern Werte für den Heiz-/Kühlbedarf und die maximale Heiz-/Kühlleistung sowie ein normalisiertes Bedarfsprofil auf Basis des stündlichen Verbrauchs.

#### 2. Profil pro Gebäude („Blaupausenfusion“)

In der anschließenden „Blaupausenfusion“-Phase wurde der Bau-/Entwicklungsplan des *incampus* genutzt, um differenzierte Profile für einzelne Gebäude zu erstellen. Um die komplexen Gebäudestrukturen widerzuspiegeln, die in einem industriellen Umfeld wie dem *incampus* zu finden sind, werden die zwei Archetypen miteinander kombiniert (siehe Tabelle 1). Während einfache Strukturen einem einzigen Archetyp entsprechen können, werden für komplexeren Einrichtungen, wie z. B. Labore mit Büroräumen, die Archetypen zu einem kombinierten Profil zusammengeführt.

Wenn zusätzliche Informationen (z. B. Personendichte, Raumhöhe, Belüftung, interne Wärmegewinne) verfügbar sind, können diese Profile weiter verfeinert werden, um den

spezifischen thermischen Anforderungen besser zu entsprechen, wie die Anpassungen für die Anforderungen der Energiezentrale oder der Mehrzweckhalle zeigen (siehe Tabelle 1, letzte Zeile). Die relative zeitliche Verteilung der Anforderungen wird bei den Archetypen beibehalten. Durch eine Skalierung dieser Profile auf die Gesamtfläche der einzelnen Gebäude wird schließlich der gesamte Heiz- und Kühlbedarf berechnet.

**Tabelle 1.** Überblick über die Gebäudetypen, ihre jeweiligen Anteile an den Archetypen und dem daraus resultierenden thermischen Energiebedarf [3] (Werte in fester Schrift markieren gebäudespezifische Anpassungen).

Bau-phase	Gebäude Typ	Büro Archetyp	Werkstatt Archetyp	Spezifischer Wärmebedarf (kWh/m <sup>2</sup> a)	Spezifischer Kühlbedarf (kWh/m <sup>2</sup> a)
1	Büro	100 %	0 %	34	25
1	Sicherheitszentrum	44 %	56 %	29	78
1	Energiezentrale	17 %	83 %	<b>34</b>	<b>12</b>
1	Hochhaus	100 %	0 %	34	25
...	...				
4	Mehrzweckhalle	100 %	0 %	<b>48</b>	<b>7</b>

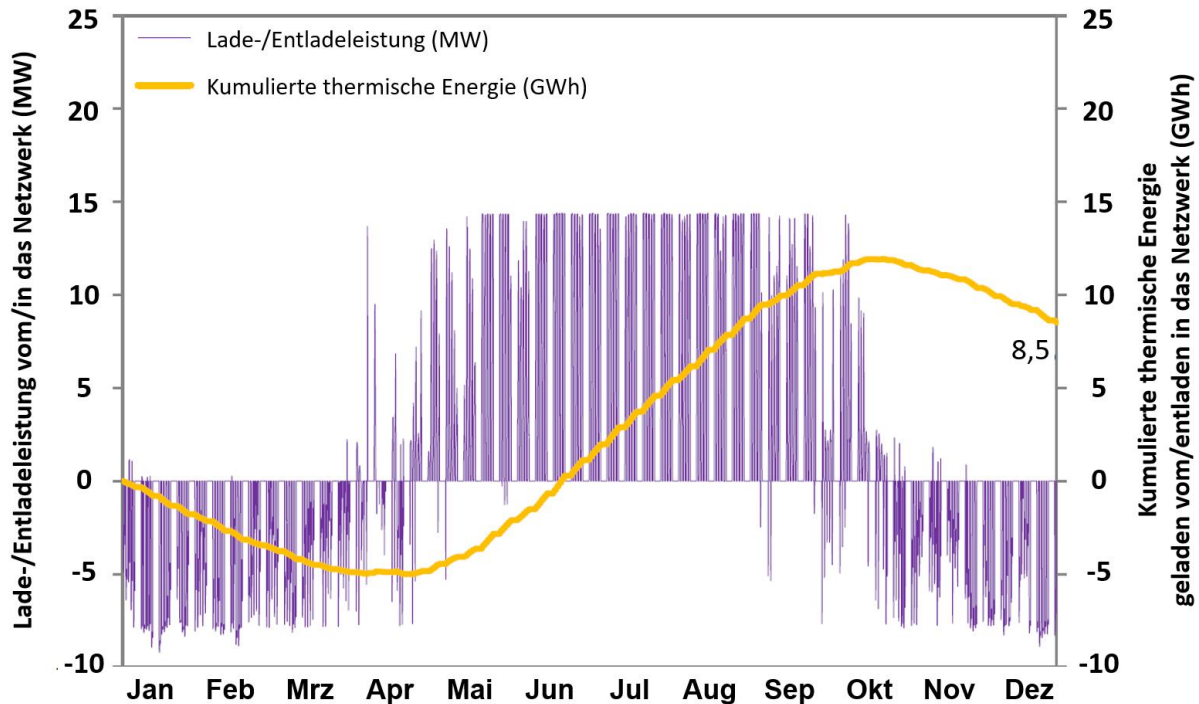
Neben dem Energiebedarf ist das Temperaturniveau, auf dem Wärme oder Kälte bereitgestellt werden muss, ein entscheidender Aspekt in diesem Planungsschritt. Daher sind Überlegungen zum Temperaturniveau integraler Bestandteil der Gesamtkonzeption des *incampus*-Energiesystems. Von Anfang an werden konsequente Entscheidungen hinsichtlich einer Deckung des Wärmebedarfs auf niedrigen Temperaturniveaus getroffen. Beispielsweise ist festgelegt, alle Gebäude mit thermisch aktivierten Gebäudestrukturen auszustatten. Darüber hinaus sind bei der Planung des *incampus* explizit Prozesse ausgeschlossen, die typischerweise mit hohen Temperaturniveaus einhergehen. Durch diesen strategischen Ausschluss konzentriert sich das Energiesystem auf die Deckung des nicht-prozessbedingten Wärmebedarfs.

### 3. Kombination mit Wärmepumpenmodell („Energetische Umwandlung“)

In der Phase „Energetische Transformation“ werden die entwickelten thermischen Lastprofile mit einem Wärmepumpenmodell kombiniert und die unterschiedlichen Wärme- und Kältebedarfe in Strombedarf überführt. Gleichzeitig werden in diesem Schritt potenzielle Auswirkungen auf das 5GDHC-Netz berücksichtigt, das je nach Betriebsfall als Wärmequelle oder -senke für die Wärmepumpe dient. Dadurch wird der gebäudespezifische Bedarf in Profile umgewandelt, die sich in ein zusammenhängendes Systemmodell für den *incampus* überführen lassen.

#### 4. Zusammenführung in ein Netzwerk („Ganzheitliche Synergie“)

In der Phase „Ganzheitliche Synergie“ werden schließlich die einzelnen Gebäudeprofile zu einem Netzwerk zusammengeführt (siehe Abbildung 3). Dieser Schritt ermöglicht eine ganzheitliche Bewertung des Energieszenarios und erleichtert eine detaillierte Bewertung der Systemleistung und -effizienz.



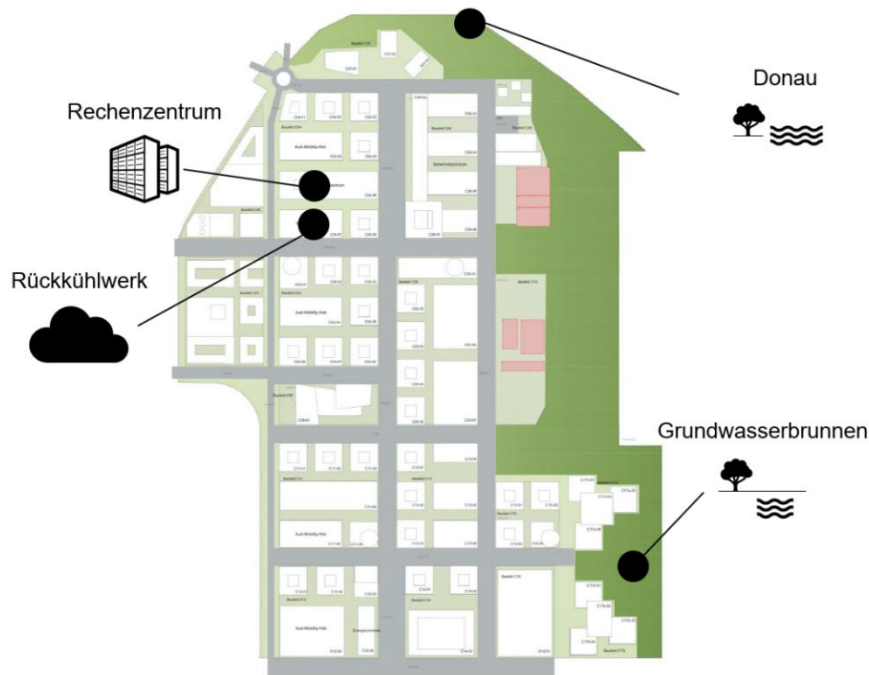
**Abbildung 3.** Resultierende Lade- und Entladeleistung für das 5GDHC-Netz (lila) und kumulierte Energie (gelb) innerhalb des 5GDHC-Netzes als Ergebnis des gesamten Wärmeenergieumsatzes aller dezentraler Wärmepumpen des *incampus* [3].

Abbildung 3 zeigt, dass der kombinierte Energiebedarf des *incampus* im Laufe des Jahres deutlichen Schwankungen unterliegt. In den Wintermonaten ist aufgrund des Heizbedarfs ein Nettoenergiedefizit zu verzeichnen, während ab Mitte April, wenn der Kühlbedarf steigt, das Netz einen Nettoenergiegewinn verzeichnet. Das zyklische Muster und der kumulierte thermische Überschuss von 8,5 GWh nach einem Jahr verdeutlichen den vorherrschenden Kältebedarf, welcher die Integration zusätzlicher Quellen und Senken zum Ausgleich des Systems erforderlich macht (siehe Kapitel 2.2).

Zusätzlich zur in Abbildung 3 dargestellten Analyse ist wichtig, dass diese Abbildung in erster Linie die Nettowärmebelastung oder -entladung des Netzes anzeigt. Sie filtert thermische Lasten heraus, die innerhalb des Netzes ausgeglichen werden, wie z. B. der gleichzeitige Kühl- und Heizbedarf verschiedener Gebäude. Es wird erwartet, dass dieser interne Energieausgleich, der besonders in den Übergangszeiten ausgeprägt ist, erheblich zur Effizienz und zum wirtschaftlichen Nutzen des Netzes beiträgt.

## 2.2 Einbindung verschiedener Umweltwärmequellen und -senken

Das niedrige Temperaturniveau im Netz des *incampus* bietet das Potenzial zur Einbindung externer Umweltwärmequellen und -senken. In der Planung werden verschiedene lokale und nachhaltige Quellen und Senken untersucht und ihr Potenzial zur Ergänzung des Heiz- und Kühlbedarfs des Netzes bewertet. Teil der Bewertung ist auch die Gegenüberstellung mit den Temperaturgrenzwerten des Netzes, die im Sommer 30 °C nicht überschreiten und im Winter mindestens 5 °C betragen sollen. Abbildung 4 veranschaulicht die Lage der Wärmequellen und -senken auf dem Campusgelände.



**Abbildung 4.** Lage der Wärmequellen und -senken am *incampus* (in Anlehnung an [3]).

- Die Donau bietet sich als Wärmequelle und -senke an, wobei für die Einleitung in den Fluss eine Höchsttemperatur von 30 °C vorgeschrieben ist. Außerdem ist eine Nutzung zu Kühlzwecken nur erlaubt, wenn die Temperatur des Flusses unter 25 °C liegt [4]. Mit einer angenommenen Temperaturdifferenz von 9,5 K und einem Volumenstrom von 900 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> bietet der Fluss unter optimalen Bedingungen ein Wärme- und Kältepotenzial von 10 MW [3,5].
- Die Abwärme des Rechenzentrums ist mit einer initialen Wärmeleistung von 1,83 MW eine wichtige Quelle für das System. Diese Weiterverwendung von Abwärme zu Heizzwecken ist nicht nur ein Beispiel für den Nachhaltigkeitsgedanken des 5GDHC-Netzes, sondern verbessert auch die Gesamtenergieeffizienz [3,5].
- Das luftgekühlte Rückkühlwerk ist in erster Linie für Notfall- oder Redundanzzwecke vorgesehen. Es spielt eine entscheidende Rolle in der Kühlstrategie des *incampus*, insbesondere in Sommermonaten. Mit einer Kühlleistung von 2,25 MW ist die Anlage darauf ausgelegt, einen Wärmestau innerhalb des Netzes abzuschwächen und ganzjährig ausgeglichene thermische Bedingungen sicherzustellen [3].

- Grundwasserbrunnen stellen eine weitere thermische Quelle/Senke dar. Mit einer nutzbaren Temperaturdifferenz von 5 K und einem Volumenstrom von  $170 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  bieten sie eine Wärme/Kälteleistung von 1 MW. Diese Quelle/Senke zeichnet sich besonders durch ihr gleichmäßiges Temperaturprofil aus, das eine zuverlässige Grundlage für Heiz- und Kühlanwendungen bietet [3,5].

**Tabelle 2.** Übersicht über die an das *incampus*-Energiesystem angeschlossenen Wärmequellen und -senken mit Angaben zu Volumenstrom, verfügbarer Wärmeleistung und Einschränkungen

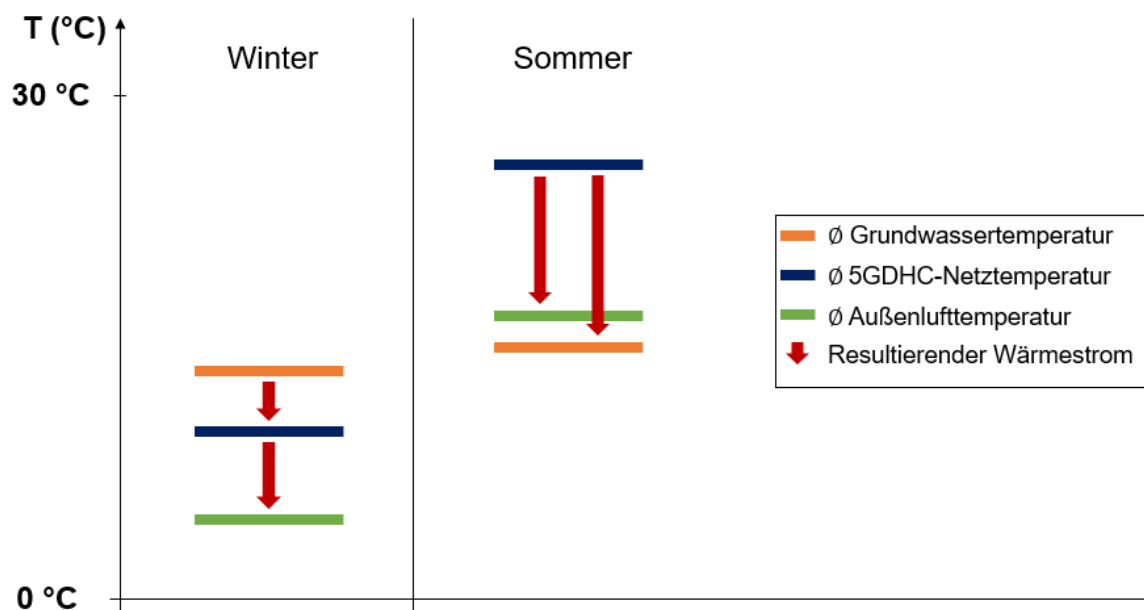
Quelle / Senke	Einschränkungen	Volumenstrom	Verfügbare thermische Leistung
Donau	Maximale Einspeisetemperatur von $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , begrenzt durch eine Flusstemperatur unter $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Zulässige Temperaturdifferenz von 9,5 K.	$900 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	10 MW
Grundwasserbrunnen	Erlaubte Temperaturdifferenz von 5 K zwischen Entnahme und Abgabe.	$170 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	1 MW
Rechenzentrum	Die Bereitstellung von Abwärme ist gegenüber der Betriebssicherheit des Rechenzentrums zweitrangig.	Flexibel (abhängig von der Größe)	1,83 MW
Rückkühlwerk	Begrenzt durch die Außenlufttemperatur	Flexibel (abhängig von der Größe)	(Sommer): 2,25 MW.

Weitere Analysen sind erforderlich, um Auswirkungen auf die Gesamtenergiebilanz vollständig zu quantifizieren. Es ist bereits ersichtlich, dass die maximal benötigte thermische Leistung, wie z. B. die Kühlleistung in den Sommermonaten von 15 MW (siehe Abbildung 3), nicht allein durch die externen Wärmequellen/-senken gedeckt werden kann. Um diese Diskrepanz auszugleichen, soll das Netz selbst als thermischer Pufferspeicher fungieren, zusammen mit anderen Speicherkapazitäten, die in Kapitel 2.4 behandelt werden. Notwendige Folgeanalysen beleuchten die Wechselwirkungen innerhalb des Netzes und bilden die Grundlage für eine Studie, die sich auf die Optimierung des Energieflusses und der Nachhaltigkeit der Wärme- und Kälteinfrastruktur des *incampus* konzentriert.

## 2.3 Analyse der Rohrdimensionierung

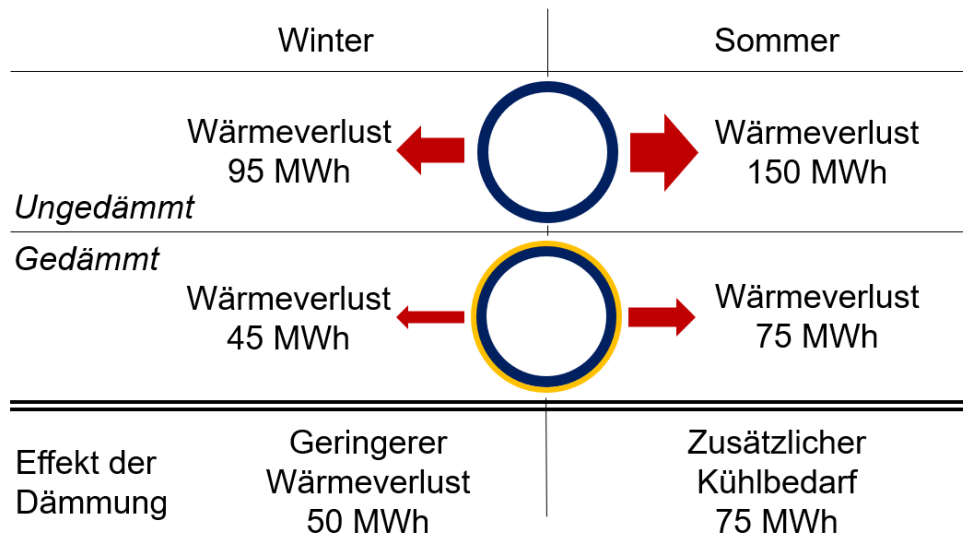
Bei der Planung von Rohrleitungsinfrastrukturen sind neben hydraulischen Berechnungen auch thermische Eigenschaften, insbesondere die Isolierung, von zentraler Bedeutung. Die Rolle der Dämmung zur Begrenzung thermischer Verluste an das umgebende Erdreich ist dabei vielschichtig. Im Winter erweist sie sich als vorteilhaft, im Sommer kann sie jedoch die (gegebenenfalls gewollte) natürliche Abkühlung durch den Bodenkontakt behindern. Angesichts des erhöhten Kühlbedarfs des Gesamtverbunds stellt das eine Herausforderung dar. Darüber hinaus wirkt sich die Isolierung erheblich auf die Fähigkeit des Netzes aus, als Quelle/Senke auf niedrigem Temperaturniveau zu fungieren. Der Einfluss der Dämmung geht also über die saisonale Effizienz hinaus und wirkt sich auf die allgemeine Betriebsflexibilität aus.

Abbildung 5 gibt einen qualitativen Überblick über die saisonale Wärmedynamik des Rohrleitungssystems (wie sie in der Planungsphase abgeschätzt wurde). Die Abschätzung nimmt an, dass der Wärmebedarf der Gebäude im Winter und die daraus resultierende Netztemperatur zu einer Wärmeübertragung vom Grundwasser (über das Erdreich) in das Wärmenetz führt und vom Netz (über das Erdreich) in die Umgebungsluft. Im Sommer ist das Temperaturniveau des Netzes am höchsten und es erfolgt damit eine verstärkte Wärmeabgabe aus dem Wärmenetz sowohl an das Grundwasser als auch an die Luft (jeweils über das Erdreich).



**Abbildung 5.** Qualitative Übersicht über die Temperaturniveaus des 5GDHC-Netzes, des Grundwassers, der Luft und die daraus resultierenden Wärmeströme (in Anlehnung an [3]).

Simulationsstudien aus [3] haben die Auswirkungen der Dämmung auf die genannten Wärmeströme quantifiziert und eine Verringerung der jährlichen thermischen Verluste von 245 MWh auf 120 MWh bei Ausführung mit Dämmung nachgewiesen. Allerdings werden nur 50 MWh der reduzierten Wärmeverluste während der Wintersaison erzielt, wie Abbildung 6 darstellt. Die anderen 75 MWh der verringerten Wärmeverluste treten im Sommerhalbjahr auf und entsprechen daher einem erhöhten (kontraproduktiven) Kühlbedarf.



**Abbildung 6.** Energetische Wirkung der Dämmung der Leitungen des *incampus*-Netzes (in Anlehnung an [3]).

Aufgrund der besseren Wirtschaftlichkeit wurde die Installation am *incampus* ohne Dämmung ausgeführt. Die thermische Kopplung des Rohrleitungssystems an das umgebende Erdreich führt kombiniert mit dem niedrigen Temperaturniveau des Netzes dazu, dass die Rohrleitungen sowohl als Wärmequelle und -senke (auf niedrigem Temperaturniveau) fungieren können.

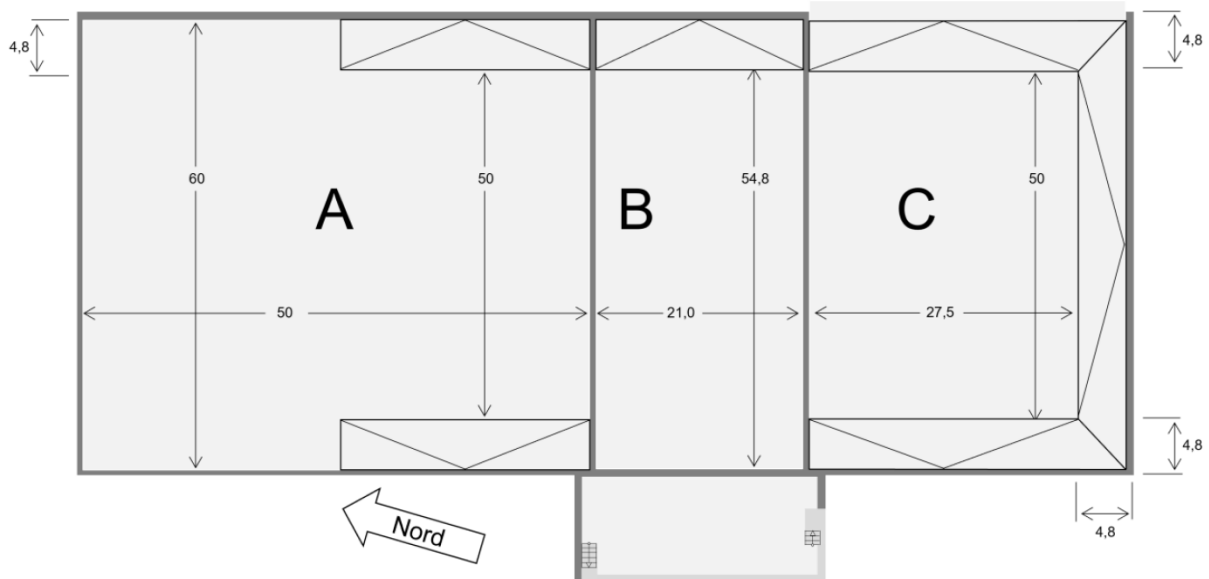
## 2.4 Integration thermischer Speicher

Die Integration thermischer Speicher in das *incampus*-Energiesystem stellt ein wesentliches Potenzial dar. Das Energiesystem verfügt über verschiedene Kapazitäten, um den Energiebedarf effektiv auszugleichen. Zum einen fungiert das Netz selbst, mit einem Wasservolumen von ca. 2.200 m<sup>3</sup>, als thermischer Puffer. Zum anderen stellen über Plattenwärmetauscher angeschlossene Löschwasserbehälter mit einem Volumen von 3.150 m<sup>3</sup> rund 130 MWh Speicherkapazität zur Pufferung kurzfristiger Bedarfsspitzen zur Verfügung.

### *Saisonale Thermische Energiespeicher*

Die größte thermische Kapazität stammt aus saisonalen thermischen Energiespeichern (sTES). Die thermische Langzeitenergiespeicherung kann energetisch sinnvoll sein und wird aufgrund unregelmäßiger Energiebedarfe und -verfügbarkeit in industriellen Prozessen immer wichtiger. Normalerweise erfordert sie jedoch große Speichervolumina und ist kostenintensiv [6]. Eine vielversprechende Lösung besteht darin, bestehende Infrastruktur, die ursprünglich nicht für thermische Speicher ausgelegt war, in Langzeitspeicher umzuwandeln. Dieser Ansatz verspricht Kosteneinsparungen und reduzierte Umweltauswirkungen.

Als ehemaliges Raffineriegelände verfügt der *incampus* über große Löschwasserbecken (siehe Abbildungen 7). Sie bieten die Möglichkeit ressourcenschonend und mit potenziellen Kostenvorteilen in Kies-Wasser-Speicher (Water-Gravel Thermal Energy Storage – WGTES) umzufunktioniert zu werden.



**Abbildung 7.** Grundriss der ehemaligen Feuerlöschbecken des *incampus* (oben) und ihr aktueller Zustand (A, B, C unten von links nach rechts).

#### *Konzeptentwicklung zur Saisonspeicherung thermischer Energie am incampus*

In einer initialen Untersuchung von Bott et al. [7] wurden verschiedene Konzepte zur thermischen Energiespeicherung unter Verwendung der bestehenden Beckenanlagen des ehemaligen Raffineriegeländes identifiziert und evaluiert. Vier sTES-Varianten wurden analysiert:

1. **Wasserspeicher** (Tank Thermal Energy Storage – TTES) mit **gestützter oder freitragender Decke**: Diese teuerste und technisch aufwändigste Option verwendet nur Wasser als Füllung und besitzt eine statisch belastbare Abdeckung.
2. **Wasserspeicher** (TTES) mit **schwimmender Abdeckung**: Eine kosteneffizientere Alternative zu gestützter oder freitragender Decke, die jedoch keine Oberflächennutzung ermöglicht.
3. **Kies-Wasser-Speicher** (WGTES): Ein System mit einer Füllung aus zwei Komponenten, das am Campus verfügbares Baumaterial nutzt und damit Kosten verringert, jedoch in der Ausgestaltung weniger flexibel ist.
4. **Erd-Wasser-Speicher** (WGTES): Eine kostensparende Option, die jedoch Einschränkungen in Statik und thermischer Kapazität mit sich bringt.

Eine Entscheidungsmatrix favorisiert den Kies-Wasser-Speicher und den Wasserspeicher mit schwimmender Abdeckung aufgrund ihrer Kapazität, Kosten, Robustheit und Sicherheit. Basierend darauf wurden mehrere Design-Szenarien entwickelt, von einem ungedämmten Baseline-Szenario mit minimalem Bauaufwand bis hin zu einem hochdifferenzierten Hochleistungs-Szenario.

Numerische Simulationen mit einem für diesen Einsatzfall entwickelten Speichermodell [8] bestätigen die Effizienz beider Szenarien für das Energiesystem, wobei das Hochleistungs-Szenario erwartungsgemäß durch seine bessere Dämmung hervortritt. Diese Ergebnisse bekräftigen die Eignung der Feuerlöschbecken als nachgenutzte thermische Speicher und ermöglichen eine erste Bewertung der Speicherleistungen. Eine darauf aufbauende Kosten-Nutzen-Analyse von Bott et al. [7] zeigt die Wirtschaftlichkeit der Betriebsszenarien im Vergleich zu möglichen Rückbaukosten unter Berücksichtigung von Material-, Infrastruktur- und Planungskosten sowie den energetischen Einsparpotenzialen: Das Baseline-Szenario weist Investitionskosten von ca. 927.000 € auf, mit Einsparungen zwischen ca. 8.000 € und ca. 34.000 € jährlich, was eine statische Amortisationszeit von ca. 23 Jahren ergibt. Das komplexere Hochleistungs-Szenario verursacht höhere Investitionen (ca. 1.266.000 €) ohne signifikant höhere Einsparungen, sodass eine Amortisationszeit von ca. 33 Jahren resultiert. Die Kosten für den Rückbau der Becken belaufen sich auf ca. 140.000 €. Zusammenfassend zeigt diese initiale Machbarkeitsstudie, dass das Baseline-Szenario gegenüber dem Hochleistungs-Szenario aus wirtschaftlicher und technischer Sicht vorzuziehen ist. Im Rahmen des aktuellen Forschungsprojekts *INTERSTORES* (siehe Folgeabschnitt) werden sowohl die Annahmen zu Investitionskosten als auch die angesetzten Energiekosten aktualisiert.

#### *Errichtung und Integration der saisonal thermischen Speicher*

Das neue Horizon-Europe-Forschungsprojekt (*INTERSTORES – International Innovation Network for the Development of Cost- and Environmentally Efficient Seasonal Thermal Energy Storages*; <https://interstores.eu/>) verfolgt das Ziel, innovative Ansätze zur Optimierung und Transformation von Beckenanlagen für die Nutzung als saisonale thermische Energiespeicher weiterzuentwickeln und zu demonstrieren. Dies erfolgt auch am *incampus*: Der Umbau der Becken beginnt 2024 und wird im Rahmen des Projektes wissenschaftlich begleitet. Im Fokus stehen die flexible Integration der großskaligen Energiespeicher in das bestehende Energiesystem, das Recycling von Abwärme an das Erdreich, sowie die Vorbereitung weiterer sTES-Einrichtungen.

Ein weiteres zentrales Element ist das detaillierte Monitoring des thermischen Verhaltens der Becken mittels hochauflösender Sensorik, einschließlich verteilter Temperaturmessung mittels Glasfaserkabel. Dies ermöglicht, die hydraulischen und thermischen Bedingungen in den Becken zu analysieren und insbesondere Wärmeleitungsverluste zu quantifizieren. Zusätzliche Sensoren in den Becken sowie im umgebenden Erdreich dienen der Bewertung der Isolation und des Einflusses auf die Umgebung.

Durch umfassendes technisches und ökologisches Monitoring zielt das Projekt darauf ab nachhaltige, effiziente und technologisch fortgeschrittene sTES-Lösungen zu realisieren und deren erfolgreiche Implementierung zu demonstrieren. Die angestrebten

Speicherkonzepte sind Teil der fortschrittlichen, fünften sTES-Generation [6], fassen etwa 30.000 m<sup>3</sup> und können bis zu 428 MWh Wärmeenergie speichern. Diese Kapazität basiert auf einer Temperaturdifferenz von 30 K, die dem Temperaturprofil des Netzes am *incampus* entspricht.

### **3 Herausforderungen und Potenziale im Betrieb**

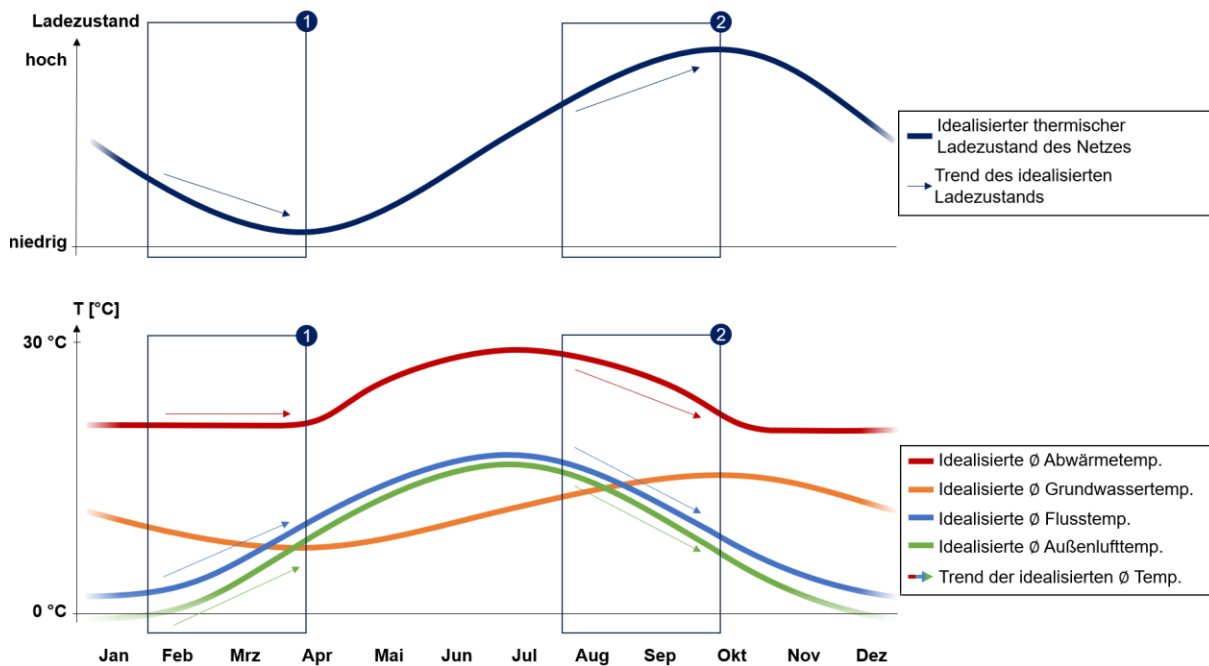
#### **3.1 Einfluss schwankender Temperaturniveaus auf die Nutzung thermischer Quellen und Senken**

Die Betriebseffizienz des 5GDHC-Netzes, das sowohl als Quelle als auch als Senke für dezentrale Wärmepumpen dient, wird durch seine eigenen Temperaturschwankungen erheblich beeinflusst. Diese Schwankungen, die in erster Linie von den saisonalen Lastprofilen abhängen, spielen eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung der thermischen Potenziale der einzelnen Wärmequellen und -senken des Systems.

In den Wintermonaten herrscht ein Wärmedefizit im 5GDHC-Netz, das durch die Heizlasten entsteht. Umgekehrt kommt es im Sommer zu Wärmeüberschüssen, die den thermischen „Ladezustand“ steigern, was zu einer Erhöhung der Gesamttemperatur des Netzes führt. Der Wärmeüberschuss im Sommer stammt von Gebäuden mit hohem Kühlbedarf, die Wärmeenergie in das Netz einspeisen.

Dieses Betriebsverhalten hat Einfluss auf die Kühlpotenziale in wärmeren Perioden: Als kritische Phase wird das Ende der Kühlperiode (August bis Mitte Oktober, siehe Abbildung 8 – Markierung 2) betrachtet, in der die sTES bereits voll beladen (aufgeheizt) sind und keine weitere Abwärme aufnehmen können. Die darüber hinaus anfallende Wärme muss dann über Senken/Kältequellen abgeführt werden. Die Temperaturprofile der verfügbaren Senken während dieser Zeit zeigen einen Selbstregulierungseffekt; mit steigendem Wärmeüberschuss (und damit steigender Temperatur) des Netzes steigt auch die nutzbare Temperaturdifferenz zu den meisten Senken, was einen effektiveren Kühlbetrieb (für das Netz) ermöglicht.

Umgekehrt steigt ab Oktober der Wärmebedarf an. Gegen Ende der Heizperiode (Februar bis Anfang April, siehe Abbildung 8 – Markierung 1) sind die thermischen Reserven der sTES voraussichtlich bereits erschöpft, was zur Verringerung des thermischen „Ladezustands“ und des Temperaturniveaus im 5GDHC-Netz führt. Weiterhin anfallende Wärmebedarfe müssen über thermische Quellen gedeckt werden. Diese Verringerung der Netztemperatur wirkt sich positiv auf die Temperaturdifferenz aus, die zwischen den Wärmequellen und dem Netz überbrückt werden muss).



**Abbildung 8.** Entwicklung des thermischen Ladezustands des Netzes (oben) und idealisierte Temperaturniveaus von Quellen und Senken (unten).

Der qualitative Überblick in Abbildung 8 zeigt die prinzipielle Fähigkeit des Netzes zur Selbstregulierung und zum Ausgleich zwischen Heiz- und Kühlbedarf durch natürliche Temperaturanpassungen. Es ist jedoch anzumerken, dass die Fähigkeit, die Temperatur zu modulieren, zwar im Hinblick auf externe Quellen und Senken von Vorteil ist, es jedoch praktische Grenzen für diese Schwankungen sowie Rückwirkungen auf die Gesamteffizienz des Energiesystems (einschließlich dezentraler Wärmepumpen und Gebäude) gibt. Um eine übermäßige Belastung der Infrastruktur (z. B. die Gefahr eines Einfrierens) zu vermeiden und gleichzeitig die Effizienz des Gesamtsystems (einschließlich der Nachfrageseite) zu optimieren, werden zusätzliche Regelungsstrategien eingesetzt. Diese sind darauf ausgerichtet, die Temperaturniveaus des Netzes zu moderieren, beispielsweise durch eine vorausschauende Nutzung von Quellen oder Senken. So wird sichergestellt, dass das System innerhalb der Einsatzgrenzen der Komponenten betrieben wird.

### 3.2 Integration und Regelung thermischer Kapazitäten

Ein Ziel des Forschungsvorhabens INTERSTORES ist die Integration saisonaler thermischer Energiespeicher in lokale Energiesysteme, um die energetische und ökonomische Effizienz zu steigern. Das Projekt entwickelt dabei multifunktionale sTES-Lösungen, die auf Anforderungen verschiedener Sektoren, wie Wohn- und Industriebereiche, abgestimmt sind und gleichzeitig flexibel auf variable Energiequellen und unterschiedliche Temperaturbedürfnisse reagieren können. Durch die Erarbeitung grundlegender Betriebsparameter und simulationsgestützte Analysen auf Komponenten- und Systemebene werden übertragbare Ergebnisse für die Integration von sTES in Energieversorgungssysteme geliefert.

Ein wesentlicher Schritt ist die Entwicklung eines digitalen Zwillings des Energiesystems inklusive Speicher. Dieser dient der Untersuchung zielführender Speicherkonfigurationen, effizienter Integrationslösungen und schließlich der Ableitung optimaler Betriebs- und Regelungsstrategien bei variablen Anforderungen. Hier strebt INTERSTORES an, durch die Entwicklung innovativer Regelungsstrategien, einschließlich modellprädiktiver Optimierung und des Einsatzes von KI und maschinellem Lernen, eine zukunftsfähige, multi-energetische Systemintegration zu realisieren.

#### 4 Fazit und Ausblick

Dieser Beitrag bietet einen Einblick in das innovative 5GDHC-Netz des *incampus*, welches ein Paradigma für Energieeffizienz und Dekarbonisierung in industriellen Anwendungen darstellt. Durch eine systematische Analyse, von der Ermittlung des Energiebedarfs hin zur Integration und Bewertung von Energiequellen und -senken, wurden wesentliche Einblicke in die Planung und Implementierung eines solch komplexen Systems gewonnen. Besonders hervorzuheben ist die Integration von Saisonalspeichern, die eine signifikante Steigerung der Systemeffizienz und -flexibilität verspricht.

Die Doppelfunktion der Isolierung, welche die thermische Effizienz des Systems im Winter steigert, gleichzeitig aber Herausforderungen für die Kühlleistung im Sommer mit sich bringt, verdeutlicht die Komplexität und die Notwendigkeit einer ausgeklügelten Planung und Betriebsführung.

Ebenso wurde aufgezeigt, welche Potenziale durch die innovative Nutzung regenerativer Energiequellen und -senken sowie bestehender Infrastrukturen und die Integration von sTES im System gewonnen werden können, mit dem Ziel, die Effizienz und Nachhaltigkeit des Systems weiter zu verbessern.

Demgegenüber stellen insbesondere die Integration der komplexen Energiequellen und -senken sowie die detaillierte Analyse und Optimierung des Energieflusses erforderliche nächste Schritte dar. Diese Herausforderungen eröffnen folgende zukünftige Forschungsperspektiven:

1. **Planungsrichtlinien und Übertragbarkeit:** Eine Voraussetzung für die Realisierung solcher Systeme ist die Entwicklung von Leitlinien für die Planung und Implementierung von 5GDHC-Systemen. Dies beinhaltet unter anderem die Formulierung einer Methodik, welche die Anpassung der Planung an verschiedene industrielle und städtische Umgebungen erleichtert.
2. **Operative Analyse und Systemleistung:** Die Validierung von Planungsannahmen mittels Vergleichs mit Simulationsvorhersagen und tatsächlichen Betriebsdaten sollte zur realen Bewertung der Effizienz und Leistungsfähigkeit von 5GDHC-Systemen in der Praxis führen. Dies ist von erheblicher Bedeutung für die Verfeinerung von Design- und Implementierungsstrategien und deren Belastbarkeit.
3. **Effiziente Integration von sTES:** Gerade in 5GDHC-Netzen verspricht die Einbindung von sTES großes Potenzial. Dies umfasst insbesondere die Flexibilität

und Resilienz gegenüber schwankenden Energiebedarfen und -angeboten. Allerdings sind spezifische Untersuchungen hinsichtlich der Speichergestaltung sowie des Betriebsmanagements unter diesen Betriebsbedingungen erforderlich.

Zusammenfassend leistet diese Studie einen Beitrag zum Verständnis und zur Weiterentwicklung nachhaltiger Energieversorgungssysteme. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine solide Grundlage für die Weiterführung der Forschung und Entwicklung im Bereich der nachhaltigen Energiesysteme, um den Herausforderungen der Energiewende zu begegnen und einen Beitrag zu den Zielen der Klimaneutralität zu leisten.

## Danksagung



Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or CINEA. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

## Literaturverzeichnis

- [1] Buffa S, Cozzini M, D'Antoni M, Baratieri M, Fedrizzi R. 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2019;104:504–22.
- [2] Audi MediaCenter. IN-Campus GmbH: Audi und Stadt Ingolstadt sanieren Raffineriegelände für Technologiepark. [March 28, 2024]; Available from: <https://www.audi-mediacyenter.com/de/audi-am-standort-ingolstadt-5543/in-campus-5548>.
- [3] Planungsgruppe M+M AG. IN-Campus: Fortschreibung innovatives Energiekonzept Ergebnisse. Stand Vorplanung; 2017.
- [4] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer: OGewV; 2016.
- [5] Heider M. Entwicklung von Energieversorgungskonzepten mit regenerativen Energien für einen neuen Standort der Audi AG. Bachelorarbeit. Regensburg; 2015.
- [6] Bott C, Dressel I, Bayer P. State-of-technology review of water-based closed seasonal thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2019;113:109241.
- [7] Bott C, Bär K, Trinkl C, Bayer P, Zörner W, Goldbrunner M. Entwicklung von multifunktionalen und kombinierten großskaligen Erdbecken-Langzeitspeichern für Wärme und Kälte. Abschlussbericht zum Projekt der Technischen Hochschule Ingolstadt. Ingolstadt; 2022.
- [8] Bott C, Ehrenwirth M, Trinkl C, Bayer P. Component-based modeling of ground-coupled seasonal thermal energy storages. *Applied Thermal Engineering* 2022;214:118810.