

Die Rolle überregionaler Fernwärmeverbundsysteme in Bezug auf die Versorgungssicherheit der Wärmeversorgung

Josef Steinegger¹⁽¹⁾, Aron Lackner⁽¹⁾, Thomas Kienberger⁽¹⁾

⁽¹⁾ Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, Montanuniversität Leoben, Parkstraße 31, 8700 Leoben, +43 3842 402 5421, josef.steinegger@unileoben.ac.at, www.evt-unileoben.at

⁽²⁾ Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, Montanuniversität Leoben, Parkstraße 31, 8700 Leoben, +43 3842 402 5421, aron.lackner@unileoben.ac.at, www.evt-unileoben.at

⁽³⁾ Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, Montanuniversität Leoben, Parkstraße 31, 8700 Leoben, +43 3842 402 5421, thomas.kienberger@unileoben.ac.at, www.evt-unileoben.at

Kurzfassung:

Zur Deckung des Wärmebedarfs kommen verschiedene Systeme der Wärmeversorgung in Frage. Eine verbreitete Methode ist die dezentrale Wärmeversorgung über Wärmenetze, die in ihrer Struktur variieren können. Während kleinere Fernwärmesysteme oft von einer einzigen Anlage betrieben werden, können größere, überregionale Systeme meist auf eine Anlagenpark zurückgreifen. Ob sich die Integration solcher Fernwärmeverbundsysteme durch die Vernetzung lokaler Wärmenetze mittels Übertragungsleitungen durchsetzt, hängt von Aspekten wie Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit ab. In dieser Arbeit wird die zeitliche Verfügbarkeit von Wärme für Endkunden in einem lokalen Wärmenetz mit und ohne überregionalen Fernwärmeverbundsystemen untersucht. Bewertet wurden Metriken wie Ausfallsicherheit, Autarkie, Erneuerbaren-Durchdringung und Diversifikation. Die Ergebnisse zeigen, dass ein lokales Wärmenetz mit Anbindung zu einem überregionale Fernwärmeverbundsysteme, unter Berücksichtigung bestimmter Kriterien, eine höhere Versorgungssicherheit bieten kann als lokale Netze ohne Anbindung. Zudem lassen sich durch den Anschluss an ein überregionales Fernwärmeverbundsystem erhebliche Redundanzen abbauen, die aktuell als Backup in den lokalen Wärmenetzen vorgehalten werden.

Keywords: Überregionale Fernwärmeverbundsystemen, Versorgungssicherheit, Industrielle Abwärme, Wärmenetze

1 Einleitung

Die Wärmeversorgung zur Deckung des Bedarfs an Raumwärme und Warmwasser ist insbesondere in den Regionen nördlich des Äquators von entscheidender Bedeutung. Zur Bereitstellung dieser Wärme gibt es viele unterschiedliche Konzepte von zentralen, lokalen Lösungen bis hin zu dezentralen überregionalen Versorgungskonzepten. Zentrale, lokale

¹ Jungautor

Lösungen dienen in der Regel der Deckung des Eigenbedarfs einzelner privater Haushalte oder Unternehmen. Dezentrale Lösungen hingegen werden häufig von Genossenschaften oder Unternehmen betrieben und finden ihre Umsetzung in Form von Wärme- und Fernwärmenetzen. Wärmenetze zeichnen sich dadurch aus, dass sie Wärme mittels Leitungen von Wärmequellen zu Wärmesenken transportieren [1]. Die Art des Transportmediums in Wärmenetzen hängt von der jeweiligen Generation [2] des Netzes ab und kann vorwiegend entweder erwärmtes Wasser oder Wasserdampf sein. Wärmenetze, die eine bestimmte Größenordnung überschreiten, mit erneuerbarer oder nachhaltiger Wärme betrieben werden und lokale Wärmenetze verbinden, werden gemäß Moser et al. [3] als überregionale Fernwärmeverbundsysteme (ÜFWVS) klassifiziert. Derzeit existieren weltweit jedoch keine Netze, die diese Kriterien vollständig erfüllen, da überregionale Netze bislang nicht vollständig nachhaltig oder erneuerbar betrieben werden. Das Kopenhagener Fernwärmenetz kommt dieser Definition allerdings am nächsten. Die Integration von ÜFWVS kann zu grundlegenden Veränderungen im Wärmesektor führen. Die Wärmeversorgung entwickelt sich in solchen Netzen von einem meist monopolistisch geprägten Ansatz hin zu einem System, das zahlreiche, voneinander unabhängige Wärmequellen einbindet. Dieser neue Ansatz hat auch einen bedeutenden Einfluss auf die Versorgungssicherheit.

1.1 Aktueller Stand der Forschung

Der Begriff Energiesicherheit wird häufig mit der Verfügbarkeit von Energie assoziiert. Er umfasst jedoch zahlreiche Dimensionen, Komponenten und Metriken, die eine präzise Analyse erschweren können. Ohne einen klar definierten Untersuchungsrahmen besteht die Gefahr, dass Bewertungen zur Energiesicherheit zu uneinheitlichen und schwer nachvollziehbaren Ergebnissen führen, anstatt die gewünschte Klarheit und Struktur zu schaffen. Dadurch hat sich Energiesicherheit zu einem Sammelbegriff entwickelt, der eine Vielzahl unterschiedlicher politischer Ziele vereinen kann. [4]

Zahlreiche Publikationen beschäftigen sich in dieser Hinsicht mit möglichen Dimensionen und deren Wichtigkeit. Zum Beispiel reiht Azzuni et al. [5] die unterschiedliche Dimensionen basierend auf ihrer Vorkommen in wissenschaftlich Arbeiten. Ang et al. [6] untersucht in seiner Arbeit 83 unterschiedliche Definitionen zu Energiesicherheit und legt sich dabei auf sieben Dimensionen fest. Diese umfassen Energieverfügbarkeit, Infrastruktur, Energiepreise, gesellschaftliche Auswirkungen, Umwelt, Regierung und Energieeffizienz.

Ren et al. [8] fassen das Thema Energiesicherheit in vier Dimensionen und 24 Metriken zusammen, um eine umfassende und gleichzeitig einfache Bestimmung dieses Faktors zu ermöglichen. Die Dimensionen umfassen Verfügbarkeit, Erschwinglichkeit, Akzeptanz und Zugänglichkeit. Die jeweiligen Metriken zu den Dimensionen sind in Abbildung 1 dargestellt. Die Autoren analysieren zudem die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Metriken und präsentieren eine Methode, um die gegenseitigen Einflüsse der Metriken zu bewerten. Dabei zeigen sie auf, wie diese Wechselwirkungen die Bedeutung der einzelnen Dimensionen beeinflussen.

Im Kontext von Strom- und Gasnetzen wird die Energie- und Versorgungssicherheit häufig anhand der Kennwerte System Average Interruption Duration Index (SAIDI), System Average Interruption Frequency Index (SAIFI) und Customer Average Interruption Duration Index (CAIDI) bewertet. SAIDI beschreibt die mittlere Unterbrechungsdauer bezogen auf die

Netzverfügbarkeit pro Kunde, SAIFI die mittlere Unterbrechungshäufigkeit der Netzverfügbarkeit pro Kunde und CAIDI die durchschnittliche Dauer einer Versorgungsunterbrechung in einem Jahr. [9]

<p>Verfügbarkeit</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Ausfallsicherheit</u> • <u>Autarkie</u> • <u>Diversifizierung</u> • <u>Erneuerbare Energie</u> • Technologische Reife 	<p>Erschwinglichkeit</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Preisstabilität</u> • <u>Abhängigkeit</u> • Marktliquidität • <u>Dezentralisierung</u> • <u>Elektrifizierung</u> • <u>Unabhängigkeit</u>
<p>Akzeptanz</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Umwelt</u> • Soziale Zufriedenheit • Nationale Regierung • Internationale Regierung • Transparenz • <u>Effizienz</u> • Innovation • Investitionen & Beschäftigung 	<p>Zugänglichkeit</p> <ul style="list-style-type: none"> • Importstabilität • Handel • Politische Stabilität • Militärische Macht • Sicherheit und Zuverlässigkeit <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>Qualitative Metrik <u>Messbare Metrik</u></p> </div>

Abbildung 1: Dimensionen und Metriken der Energiesicherheit [8]

Basierend auf den physischen Eigenschaften von Wärmenetzen und der Wärmeträgheit von Gebäude, ist die Definition von Unterbrechungen im Wärmenetzbetrieb nicht so eindeutig wie in Strom- oder Gasnetzen, in denen es bei Unterbrechungen zu einem kompletten Lieferstopp, mit direkten Auswirkungen auf den Kunden, kommen kann. Aus diesem Grund definiert Schwarz [10] Unterbrechungen in Wärmenetzen in drei Stufen, wobei die dritte Stufe einer Versorgungsunterbrechung, vergleichbar zu Unterbrechungen in Gas- und Wärmenetzen, darstellt:

- **Stufe 1:** Diese Stufe beschreibt einen Zustand, bei dem das System den gesamten Bedarf decken kann oder etwaige Defizite durch die Wärmeträgheit des Gebäudes aufgefangen oder durch Flexibilitätsinstrumente wie Lastverschiebung oder Demand Response ausgeglichen werden können. Das maximal zulässige Defizit in jeder Übergabestation darf dabei 1 % der momentanen Nachfrage nicht überschreiten.
- **Stufe 2:** Diese Stufe beschreibt einen Zustand, bei dem Defizite von über 1 % auftreten. Aufgrund der Wärmeträgheit des Gebäudes werden sie jedoch vom Kunden bei kurzfristigem Auftreten nicht wahrgenommen. Die Dauer, während der ein solches Defizit unbemerkt bleibt, variiert je nach Quelle. Schwarz [10] legt in seiner Arbeit eine Zeitdauer im unteren Spektrum von 10 Minuten fest. Zudem darf das Defizit 10 % nicht überschreiten.
- **Stufe 3:** Diese Stufe wird erreicht, wenn das Defizit an Wärmeversorgung vom Kunden wahrgenommen wird. Dieser Fall kann auftreten, wenn Defizite größer 10 % auftreten

oder Defizite kleiner 10 % länger andauern als die in Stufe zwei definierte maximal zulässige Dauer.

1.2 Gegenstand der Arbeit

Wie in der Einleitung beschrieben, führt die Integration eines ÜFWVS zu einem neuen Markt, der durch zahlreiche unabhängige Wärmequellen sowie lange Wärmeübertragungsleitungen gekennzeichnet ist. Eine derartige Veränderung wirkt sich direkt auf die Versorgungssicherheit aus und unterscheidet sich somit deutlich von herkömmlichen Wärmenetzen. Aus der bestehenden Forschung geht hervor, dass es eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden zur Bestimmung der Energiesicherheit gibt. Diese Ansätze sind jedoch meist auf die allgemeine Energiesicherheit von Nationen oder großräumigen Einheiten ausgelegt und daher nicht zur Bewertung einzelner Systeme geeignet. In Strom- und Gasnetzen existieren hingegen spezifische Kennwerte, die die Versorgungssicherheit abbilden und von Schwarz [10] auf Wärmenetze übertragen werden. Diese Kennwerte beschreiben jedoch lediglich Versorgungsunterbrechungen und berücksichtigen nicht andere Metriken, die die Verfügbarkeit beeinflussen und somit auch die Ursachen dieser Unterbrechungen darstellen können. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, auf der Grundlage geeigneter Dimensionen und ausgewählter Metriken aus der Literatur ein einfaches Modell zu entwickeln, mit dem verschiedene Fernwärmesysteme hinsichtlich ihrer Versorgungssicherheit verglichen werden können. Damit ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- Wie kann die Versorgungssicherheit im Fernwärmesektor für unterschiedliche Systeme einfach bestimmt werden und welche Dimensionen und Metriken sind dafür nötig?
- Wie wirkt sich die Integration eines ÜFWVSs im Vergleich zu herkömmlichen Fernwärmesysteme auf die Versorgungssicherheit aus?
- Welche Effekte könnte der Anschluss eines lokalen Wärmenetzes an ein ÜFWVS auf die lokale Versorgungsstruktur haben und welche Aspekte in Bezug auf die Versorgungssicherheit sollten dabei berücksichtigt werden?

Um die genannten Forschungsfragen zu beantworten, ist die vorliegende Arbeit in zwei Teile gegliedert. Im ersten Abschnitt werden die angewandte Methodik sowie die ausgewählten Dimensionen und Metriken detailliert beschrieben. Im zweiten Abschnitt wird die entwickelte Methodik auf ein theoretisches ÜFWVS in der Steiermark angewandt, wobei dessen Auswirkung auf die Versorgungssicherheit mit der von konventionellen Systemen verglichen wird.

2 Methodisches Vorgehen

Zur Bestimmung der Versorgungssicherheit im Wärmesektor für unterschiedliche Systeme stützt sich die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik auf verschiedene Ansätze aus der Literatur. Um die präsentierten Ergebnisse in einem geeigneten Rahmen zu halten, liegt der Fokus dieser Studie auf der in der Literatur beschriebenen Dimension Verfügbarkeit. Wobei im Detail die Metriken Ausfallsicherheit, Autarkie, Diversifizierung und erneuerbare Energie untersucht werden. Weitere Dimensionen und Metriken wurden bereits in anderen Arbeiten von Steingger et al. [11–13] für ÜFWVS untersucht.

Im Folgenden werden die vier angewandten Metriken der Verfügbarkeit beschrieben, um eine einfache und kompakte Methode zu präsentieren, welche es ermöglicht, Fernwärmesysteme auf ihre Versorgungssicherheit zu überprüfen.

2.1.1 Ausfallsicherheit

Die Ausfallsicherheit in Wärmenetzen kann, wie bereits im Literaturteil beschrieben, ähnlich wie im Gas- und Stromnetz bestimmt werden. Dazu können die Kennzahlen SAIDI, SAIFI und CAIDI wie in den Formeln (2-1), (2-2) und (2-3) beschrieben, berechnet werden. Wobei n die Anzahl der betroffenen Netzbenutzer je Anlassfall j ist, N die Gesamtanzahl der Netzbenutzer ist und t die Unterbrechungsdauer je Anlassfall beschreibt. [9]

$$SAIDI = \frac{\sum_j n_j \cdot t_j}{N} \quad (2-1)$$

$$SAIFI = \frac{\sum_j n_j}{N} \quad (2-2)$$

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad (2-3)$$

Die Definition einer Versorgungsunterbrechung folgt der von Schwarz [10] vorgeschlagenen und im Literaturteil beschriebenen Definition, wobei die kritische Ausfalldauer von 10 Minuten auf 15 Minuten angepasst wird. Diese Anpassung ermöglicht es, dass Lastflusssimulationen mit einer 15-minütigen zeitlichen Auflösung Ausfälle entsprechend berücksichtigen können. Zur Berechnung der einzelnen Kennzahlen kann eine Lastflussberechnung, wie in [14] beschrieben, verwendet werden.

2.1.2 Autarkie

Diese Metrik bezieht sich auf eine gewählte Bilanzgrenze. Energie, die durch Rohstoffe innerhalb dieser Bilanzgrenze zur Wärmeerzeugung gewonnen werden kann, wird als autarkieerhöhende Energie E_{eig} betrachtet. Der Autarkiegrad A ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen der Energie aus Eigenmitteln E_{eig} und der gesamten eingesetzten Energie E_{ges} . Dabei beziehen sich die Energiemengen auf den Energieinhalt vor den jeweiligen Umwandlungsprozessen. In der Literatur wird kontrovers diskutiert, ob und wie der Energieaufwand, der für die Erzeugung eines Primärprodukts aufgebracht wird, der entstehenden Abwärme zugerechnet werden kann. In dieser Arbeit wird die Wärme aus industrieller Abwärme mit der Energiemenge gleichgesetzt, die vor dem Umwandlungsprozess in konventionellen Wärmegewinnungsanlagen bereitgestellt wird. Ob diese Energiemenge dem Energieteil aus Eigenmitteln zugerechnet werden kann, hängt von dem Bezugsraum der für das primär Produkt eingesetzten Energie ab. Die Energiemenge für Wärme aus erneuerbarer Energie entspricht bei brennstofffreien Technologien der bezogenen Wärmemenge und wird der Energie aus Eigenmitteln angerechnet. Die verwendete Gleichung zur Bestimmung des Autarkiegrades ist in Formel (2-4) dargestellt.

$$A = \frac{E_{eig}}{E_{ges}} \quad (2-4)$$

2.1.3 Diversifizierung

Diese Metrik reflektiert die Diversität der Wärmeversorgung in Bezug auf die eingesetzten Technologien. Sie kann mithilfe des Shannon-Wiener-Index SWI , wie in Formel (2-5) [15] gezeigt, berechnet werden. Dabei berücksichtigt z die Anzahl der unterschiedlichen installierten Technologien zur Wärmegewinnung und S_i das Verhältnis der installierten Leistung der jeweiligen Technologie i zur gesamt installierten Leistung.

$$SWI = - \sum_{i=1}^z S_i \cdot \ln S_i \quad (2-5)$$

2.1.4 Durchdringungsrate erneuerbare Energie

Als Technologien für erneuerbare Energie werden alle angesehen, die bei der Wärmeerzeugung entweder CO_2 neutral sind oder kein CO_2 erzeugen. Der Anteil der Wärme aus erneuerbarer Energie Q_{ren} , also die Wärmemenge, die nach dem Umwandlungsprozess verfügbar ist, wird ins Verhältnis zur über ein Jahr insgesamt verbrauchten Wärmemenge Q_{con} gesetzt. Daraus ergibt sich die Durchdringungsrate von erneuerbaren Technologien ROP zur Wärmegewinnung, wie in Formel (2-6) gezeigt.

$$ROP = \frac{Q_{ren}}{Q_{con}} \quad (2-6)$$

2.1.5 Bewertung der Metriken

Tabelle 1 bietet eine Übersicht über alle angewandten Metriken und deren Bedeutung für die Dimension der Verfügbarkeit in Wärmenetzen und somit für die Versorgungssicherheit im Fernwärmesektor.

Tabelle 1: Metriken der Dimension Verfügbarkeit

Metrik	Kennzahlen	Niedriger Wert	Hoher Wert	Bedeutung
Ausfallsicherheit	SAIDI, SAIFI, CAIDI	Gut	Schlecht	Desto kleiner die Werte, desto geringer die Ausfälle und die Ausfalldauern.
Autarkie	A	Schlecht	Gut	Desto höher der Wert, desto unabhängiger und somit weniger anfällig ist das System.
Durchdringungsrate erneuerbare Energie	ROP	Schlecht	Gut	Desto höher der Wert, desto geringer die lokalen Emissionen, wodurch die Akzeptanz des Systems erhöht werden könnte.
Diversifizierung	SWI	Schlecht	Gut	Desto höher der Wert, desto weniger ist das System von einer einzelnen Technologie abhängig, wodurch das System resilienter wird.

3 Case Study

Dieses Kapitel gliedert sich in zwei Abschnitte: Der erste Abschnitt beschreibt das analysierte Fernwärmesystem, während der zweite Abschnitt erklärt, wie die Ausfallwahrscheinlichkeiten von Wärmequellen und im Wärmeverteilungssystem bestimmt sind. Um festzustellen, ob die aus Industrieprozessen gewonnene Abwärme der Kategorie "Energie aus Eigenmitteln" zugeordnet werden kann, wird die Energieaufbringung der einzelnen Branchen in Österreich herangezogen. Als Bilanzgrenze wurden die Landesgrenze des Landes Österreich gewählt. Die diesbezüglichen Werte sind in Tabelle 10 gezeigt, wobei der Anteil des benötigten Stroms über die Eigenaufbringung in Österreich umgeschlüsselt ist. Falls unternehmensspezifisch genauer Daten vorhanden sind, sind diese verwendet. Die resultierenden Werte sind jedoch lediglich als Näherungswerte zu betrachten, da einerseits die angenommenen Werte nur Richtwerte darstellen und andererseits, wie bereits in Kapitel 2.1.2 erläutert, die Zuordnung der Abwärme zum Energieeinsatz in der Literatur umstritten ist.

Tabelle 2: Energieanteil aus Eigenmitteln für unterschiedliche Branchen

Branche	Anteil Energie aus Eigenmitteln	Quelle
Papier- und Zellstoffindustrie (2022)	63,7 %	[16]
Stahlindustrie - Hochofenroute (2022)	4,2 %	[17,18]
Stahlindustrie - Elektrolichtbogenofen (2022)	67,0 %	[18,19]
Zementindustrie (2022)	79,5 %	[18,20]

3.1 Untersuchtes Fernwärmesystem

Zur Bewertung der Versorgungssicherheit des ÜFWVS wurde ein lokales Netz analysiert, das im in [11,12] beschriebenen ÜFWVS verortet ist. Im nachfolgenden wird, das untersuchte lokale Netze kurz beschrieben. Es soll ein mittelstädtisches Netz widerspiegeln welches in das nachfolgend beschriebene ÜFWVS eingegliedert werden könnte. Es orientiert sich an einem bestehenden Netz, wurde jedoch vereinfacht nachgebildet. Die zugrundeliegenden Daten stammen aus öffentlich zugänglichen Quellen. Die angegebenen Energiemengen beziehen sich auf das Wärmeversorgungssystem ohne die Berücksichtigung der in Kapitel 3.2 erläuterten Ausfälle. Die Kennzahlen für dieses Wärmenetz sind in Tabelle 3 beschrieben. In diesem Netz übernimmt die industrielle Abwärme die Deckung der Grundlast, während die Biomassekessel für die Versorgung der Spitzenlast und als Backup eingesetzt werden.

Tabelle 3: Kennzahlen Wärmenetz B

Attribute	Werte	Einheit
Wärmebedarf 2022	44,458	GWh
Wärmemenge aus Erneuerbarer	5,603	GWh
Gesamte Netzlänge	19,069	km
Energie aus Eigenmitteln	30,354	GWh
Gesamt eingesetzten Energie	44,947	GWh
Industrielle Abwärme (> 100°C)	16,600	MW
Zwei Biomassekessel	12,000	MW

Das lokale Wärmenetz ist in Abbildung 3 dargestellt. Dieses Netz kann beim südlichen Biomassekessel Standort und beim Abwärme Standort an das ÜFWVS angeschlossen werden.

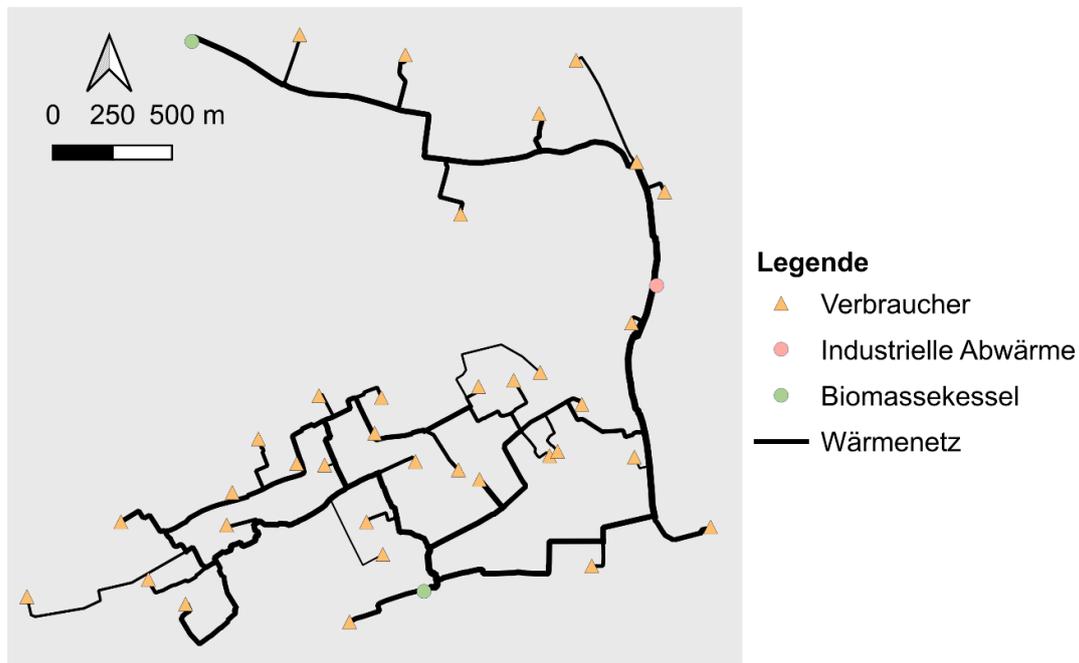


Abbildung 2: Lokales Wärmenetz

Das ÜFWVS wird im folgenden Abschnitt kurz beschrieben. Die Kennzahlen für dieses ÜFWVS sind in Tabelle 4 gezeigt. Die maximale Leistung der Kategorie „Biomassekessel“ ergibt sich zusätzlich zu den derzeit installierten Kesseln durch einen weiteren fiktiven Biomassekessel mit 40 MW_{th} zur Systemstabilisierung (sogenanntes Systemkraftwerk oder Slack, siehe Beschreibung in [11,12]). Die Ermittlung der Energiemengen vor der Umwandlung in Wärme für Kraft- und Wärmekopplungsanlagen (KWK) erfolgt in dieser Arbeit nach der finnischen Methode [21,22].

Tabelle 4: Kennzahlen Wärmenetz C

Attribute	Werte	Einheit
Wärmebedarf 2022	2361,903	GWh
Wärmemenge aus Erneuerbarer	619,239	GWh
Gesamte Netzlänge	264,031	km
Energie aus Eigenmitteln	1453,539	GWh
Gesamt eingesetzten Energie	2369,568	GWh
Industrielle Abwärme (> 100°C)	217,050	MW
Biomassekessel	152,474	MW
Biomasse / Biogaskessel Kraft-Wärme-Kopplung	27,595	MW
Solarthermie	20,070	MW
Oberflächennahe Geothermie (mit Wärmepumpen)	0,110	MW
Müllverbrennung	5,000	MW
Erdgas KWK	287,600	MW
Erdgaskessel	562,450	MW
Ölkessel	12,900	MW

Das beschriebene ÜFWVS ohne die Verwendung von Öl- und Erdgaskesseln ist in Abbildung 8 gezeigt. Grundsätzlich könnte dieses Netz, wie in [11] beschrieben, durch die Nutzung zusätzlicher Abwärmepotenziale sowie erneuerbarer und nachhaltiger Wärmequellen versorgt werden. In dieser Arbeit wird jedoch der Zustand untersucht, in dem ausschließlich die bis 2022 installierten Anlagen der betrachteten Region genutzt werden. Aus diesem Grund werden auch Anlagen berücksichtigt, die fossile Rohstoffe zur Wärmebereitstellung nutzen. Das Gas- und Dampfkraftwerk Mellach nimmt in diesem ÜFWVS eine Sonderstellung ein. Das Kraftwerk ist unter anderem auch ein wichtiger Bestandteil der österreichischen Stromerzeugungsparks. In der derzeit existierenden Form kann eine maximale Wärmeleistung von $250 \text{ MW}_{\text{th}}$ zur Versorgung der Stadt Graz und Graz-Süd bereitgestellt werden. Diese Leistung ergibt sich hauptsächlich aufgrund der Kapazitätsbegrenzung der derzeitig bestehenden Wärmeleitung. Bei entsprechender Anlagenerweiterung wäre eine maximale thermische Leistung von $400 \text{ MW}_{\text{th}}$ möglich [23]. In dieser Arbeit werden jedoch lediglich die $250 \text{ MW}_{\text{th}}$ berücksichtigt.

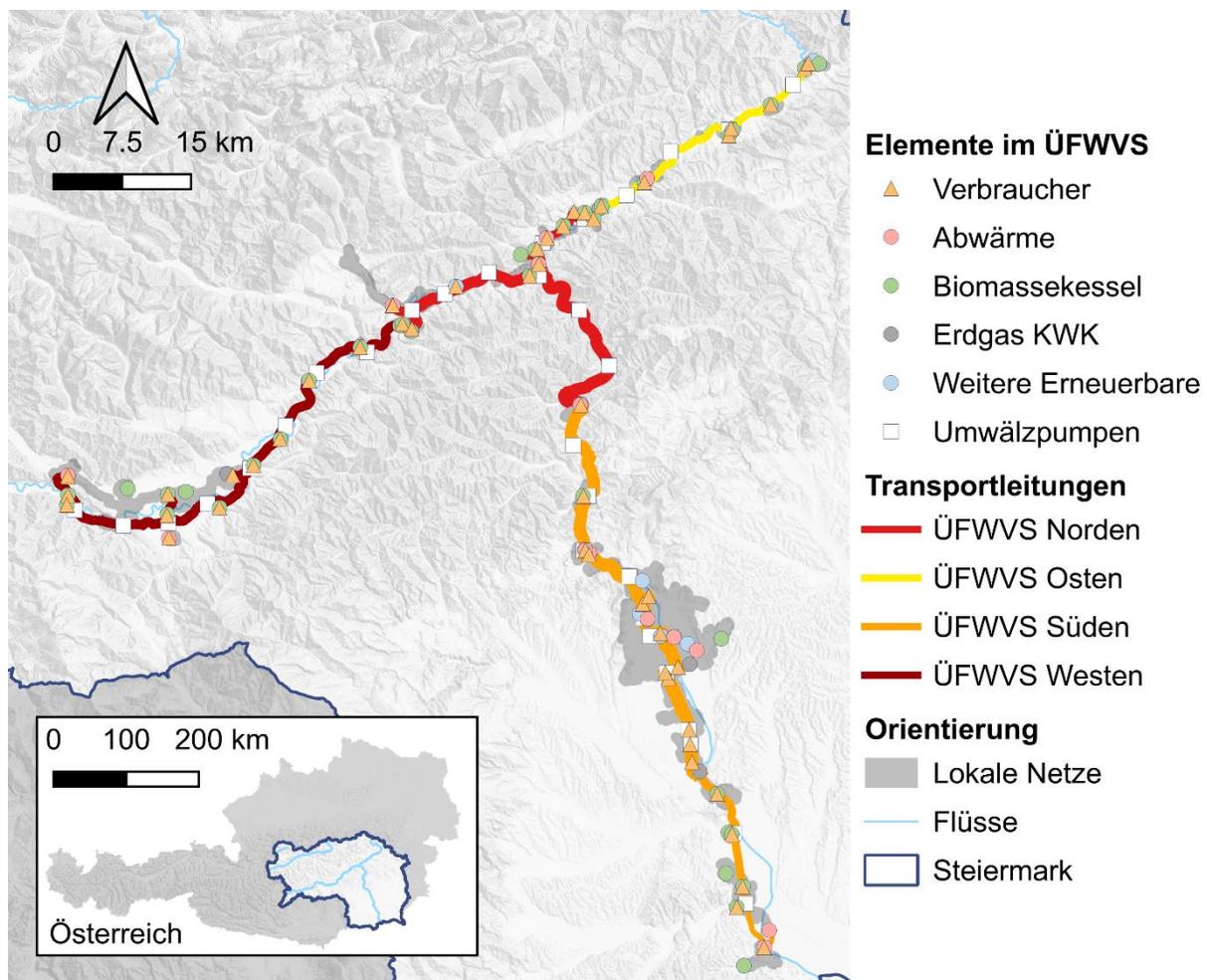


Abbildung 3: ÜFWVS [12]

3.2 Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeiten

Die folgenden Abschnitte beschäftigen sich mit der Ausfallhäufigkeit wichtiger Komponenten in Wärmenetzen.

3.2.1 Ausfälle von Wärmeleitungen

In der Arbeit von Gilski et al. [24] ist das Fernwärmenetz von Warschau auf seine Fehleranfälligkeit untersucht. Die Fehler sind auf unterschiedliche Gründe, wie zum Beispiel Oberflächenkorrosion, Lochfraß, Korrosion um die Rundnaht, Perforation an der Naht des Rohres oder in der Nähe und ähnliche Gründe zurückzuführen. Das untersuchte Netz weist drei unterschiedliche Leitungstypen (Vorisolierte Leitungen, traditionelle alte Leitungen, oberirdische Leitungen) auf, wobei die vorisolierten Leitungen jenen Leitungen entsprechen, die zurzeit den Stand der Technik repräsentieren. Für die vorisolierten Leitungen ergibt sich in der präsentierten Arbeit von Gilski et al. [24] eine Fehleranfälligkeit von 2 Ausfällen pro 100 Kilometern Trassenlänge pro Jahr. Ähnliche Werte sind auch in der Arbeit von Valinčius et al. [25] nach einer Operationszeit von 25 Jahren ersichtlich. In der Arbeit von Mattausch [26] sind mehrere Österreichische Wärmenetze auf ihre Ausfallhäufigkeit untersucht. Dabei sind große Unterschiede zwischen den jeweiligen Rohrdurchmesser erkennbar. Die ermittelten Werte sind in Tabelle 5, angepasst an 15 Minuten Simulationszeitschritte, dargestellt. Desto größer die Rohrdurchmesser, desto weniger Störungsanfällig sind die Leitungen.

Tabelle 5: Ausfallhäufigkeit Rohrleitungen [26]

Rohrdurchmesser	Ausfälle pro 100 km Trassenlänge	Mittlere Ausfallsdauer in h
DN ≤ 25 mm	38,710	5,25
DN 25 - 80 mm	11,883	8,00
DN 100 - 200 mm	5,785	8,00
DN 250 - 350 mm	0,873	7,50
DN > 400 mm	0,000	0,00

3.2.2 Ausfälle von Wärmequellen

Die Ausfallhäufigkeit und somit auch die Time Efficiency von Wärmeerzeugungsanlagen hängt unter anderem auch vom Typ der Erzeugungsanlage ab.

Expertengespräche [27] haben gezeigt, dass industrielle Abwärme je nach Branche und Anlage eine unterschiedliche Time Efficiency aufweisen können. Diese liegen meist im Bereich zwischen 95 % und 98 % pro Jahr. Viele Anlagen besitzen zusätzlich zu den eigentlichen Anlagen, Kompensationsanlagen, um Ausfälle zu kompensieren. Weitere Einflüsse, auf die Verfügbarkeit von Abwärme sind Betriebsurlaube, Wochenenden oder Feiertage. Diese Anlagen wurden Fallspezifisch untersucht. Dabei wurde für jede Anlage synthetische und individuelle maximal verfügbare Leistungsprofile erstellt.

Für KWK-Anlagen und für Heizkessel hat Mattausch [26] für in Summe 60 KWK-Anlagen bzw. für 116 Heizkessel-Anlagen die Ausfallhäufigkeit bestimmt. Diese sind in Tabelle 6 gezeigt. Da beide Werte für die Ausfallrate unter Eins liegen, wird in dieser Arbeit mit einer Zufallsvariabel bestimmt ob im Laufe eines Jahres ein Ausfall stattfindet oder nicht.

Tabelle 6: Ausfallhäufigkeit Wärmeerzeugungsanlagen [26]

Anlage	Ausfälle pro Jahr	Mittlere Ausfallsdauer in h
KWK-Anlage	0,717	< 1,0
Heizkessel	0,293	1,5

In den Fällen der in Tabelle 6 gezeigten Anlagen, sind mit Ausnahme des Kraftwerks Mellach, keine Kompensationsanlagen berücksichtigt, da eine jede Anlage für sich betrachtet wird, sodass bei einem Ausfall die gesamte Leistung vollständig entfallen würde. Das Kraftwerk Mellach besitzt zwei Erzeugungslinien mit einer jeweiligen thermischen Leistung von $125 \text{ MW}_{\text{th}}$. Es kann jedoch auch bei Ausfall einer Erzeugungslinie, bei entsprechenden Effizienzeinbußen, $250 \text{ MW}_{\text{th}}$ Wärme bereitgestellt werden [23]. Dies ist dementsprechend in der Berechnung berücksichtigt.

Für Wärmepumpen wird auf Basis von [28] eine Time Efficiency von 99,65 % angenommen. Dabei wird von einer durchschnittlichen Ausfallquote von 2,28 Ausfällen pro Jahr und einer durchschnittlichen Ausfallzeit von 13 Stunden pro Ausfall ausgegangen. Diese Kennzahlen gelten in dieser Arbeit für den Anlagentyp der oberflächennahen Geothermie in Kombination mit Wärmepumpen.

Jene Anlagen, die mittels Solarthermie Wärme bereitstellen, sind hauptsächlich durch die begrenzte Verfügbarkeit von Sonnenstunden eingeschränkt. Um dies zu berücksichtigen, werden in dieser Arbeit Einstrahlungsprofile für die jeweiligen Anlagen, auf Basis von [29,30], berücksichtigt.

3.2.3 Ausfälle weitere Elemente

Weitere potenzielle Ausfallquellen sind Wärmeübertrager in Wärmeübergabestationen sowie Umwälzpumpen und andere Anbauteile. Die Ausfallrate von Anbauteilen ist laut Mattausch [26] sehr gering und wird daher in dieser Arbeit vernachlässigt. Die Ausfallrate von Wärmeübertrager (Plattenwärmetauscher) ist nach [26] mit 0,007 pro Jahr mit einer mittleren Ausfalldauer von 3,5 Stunden angenommen und die Ausfallrate von Umwälzpumpen ist nach [26] mit 0,059 pro Jahr mit einer mittleren Ausfalldauer von 1,0 Stunden angenommen. Die Werte sind, wie zuvor, an eine Zeitschrittdauer von 15 Minuten in der durchgeführten Simulation angepasst.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Berechnungen vorgestellt. Im ersten Teil erfolgt eine Analyse des lokalen Wärmenetzes in Bezug auf die Ausfallhäufigkeiten der unterschiedlichen Komponenten. Im zweiten Teil wird die überregionale Wärmetransportleitung und dessen Versorgungsstruktur auf die genannten Ausfallhäufigkeiten untersucht. Darauf aufbauend, werden im Anschluss, die in Abbildung 4 gezeigten Szenarien auf ihre Versorgungssicherheit untersucht und auf Basis der Kennwerte SAIDI, SAIFI und CAIDI beurteilt. Als Ausgangspunkt wird das lokale Netz, wie es derzeit betrieben wird, untersucht. Daraus bilden sich drei verschiedene Szenarien Entwicklungen ab, bei denen unterschiedliche Versorgungsketten zur Bereitstellung von Wärme ausfallen. Diese Szenarien werden dann im Zusammenhang mit einem Anschluss an das ÜFWVS betrachtet. Da Ausfälle bestimmter Wärmenetzkomponenten je nach Örtlichkeit kritischer oder weniger kritisch für den Endkunden ausfallen können, werden diese Szenarien jeweils für einen kritischen und einen nicht kritischen Fall analysiert.

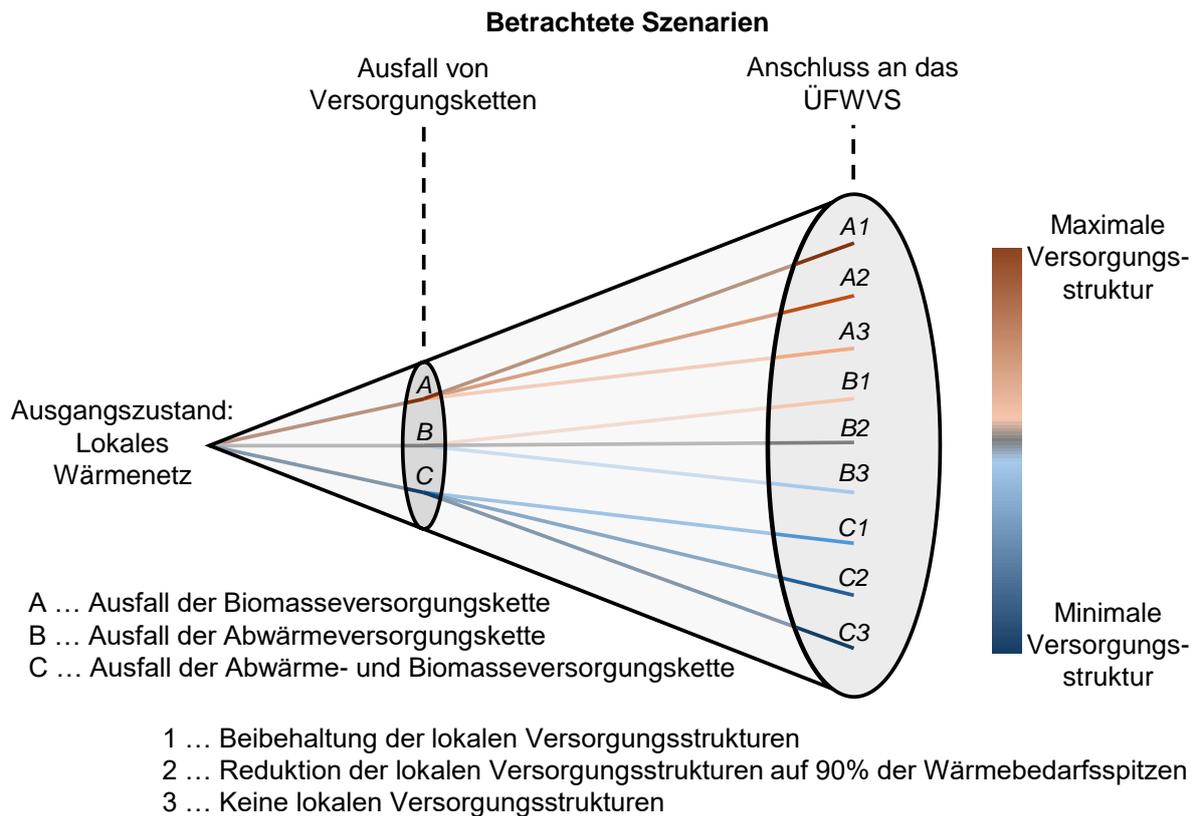


Abbildung 4: Betrachtete Szenarien

4.1 Ausfallhäufigkeiten im lokalen Wärmenetz

Im nachfolgenden Teil wird das lokale Wärmenetz auf mögliche Ausfälle der im Netz vorhandenen Komponenten untersucht.

4.1.1 Wärmeleitungen

Bei der Analyse der Wärmeversorgungsleitungen ergeben sich in den unterschiedlichen Durchmesser kategorien unterschiedliche Gesamtleitungslängen. Da wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben die Ausfallhäufigkeit pro Trassenmeter und Jahr bestimmt werden kann, ist die Länge der Leitungen essenziell zur Bestimmung von Störungen in den Leitungen. Es ergeben die in Tabelle 7 gezeigten Ausfälle.

Tabelle 7: Leitungsausfälle im lokalen Wärmenetz

Rohrdurchmesser	Länge in km	Ausfälle pro Jahr (statistisch [26])	Ausfälle pro Jahr (angenommen)	Ausfalldauer in h
DN ≤ 25 mm	0,000	0,000	0	0,00
DN 25 - 80 mm	5,882	0,699	1	8,00
DN 100 - 200 mm	15,252	0,882	1	8,00
DN 250 - 350 mm	0,008	< 0,001	0	0,00
DN > 400 mm	0,000	0,000	0	0,00

Da die Versorgungssicherheit des Endkunden nicht nur von der Anzahl der Leitungsausfälle, sondern auch von der Örtlichkeit der Ausfälle abhängt, zeigt die Abbildung 5, welche

Leitungen, jeweils von Ausfällen, nach Tabelle 7, betroffen sein können. Nicht kritisch wären Ausfälle an Stellen, die aufgrund der Vermaschung des Netzes eine Umgehung der Leitung ermöglichen würde.

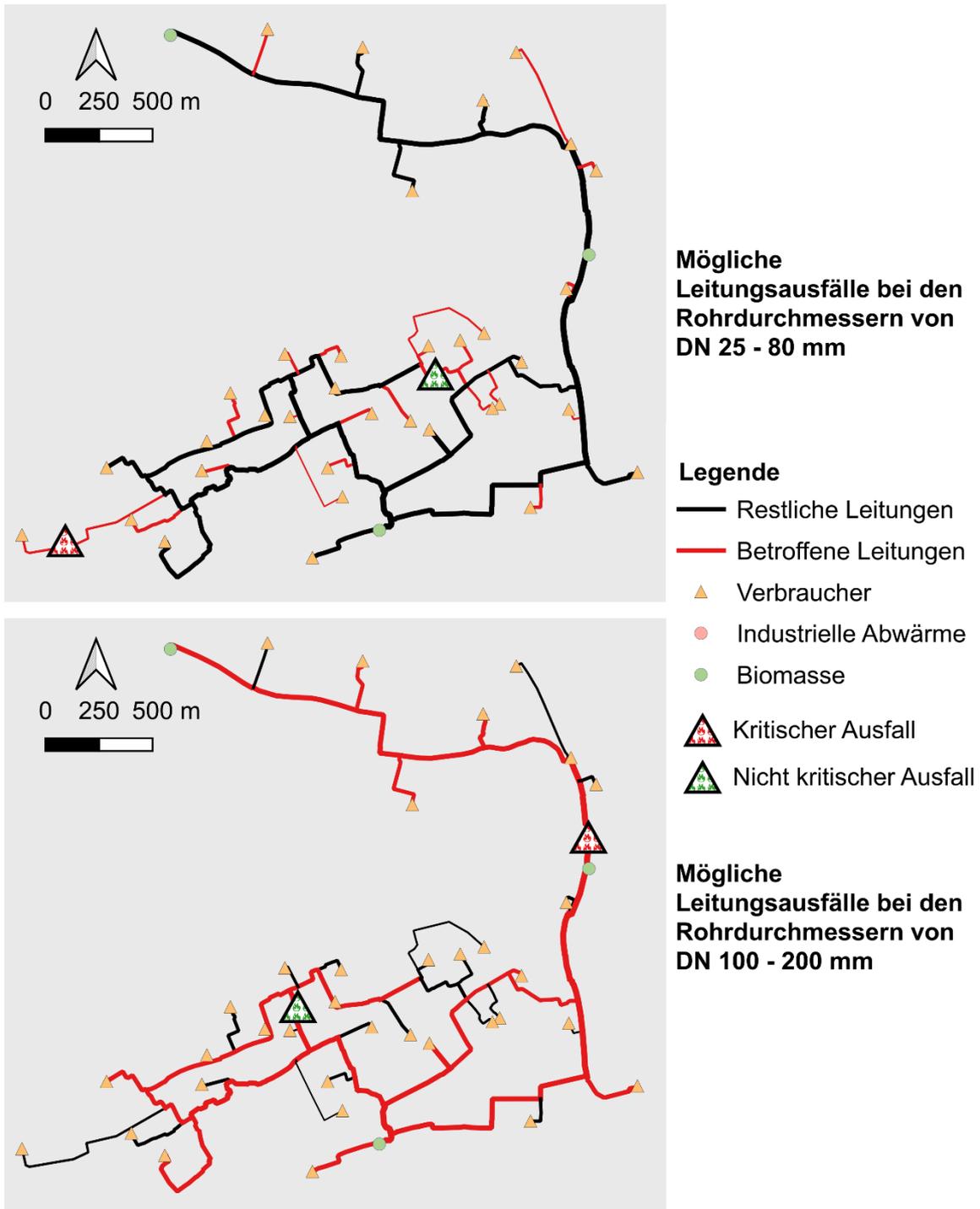


Abbildung 5: Mögliche Leitungsausfälle im lokalen Netz

4.1.2 Wärmequellen

Ausfälle bei den Wärmequellen sind, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, bei Heißwasserkesseln äußerst selten. Die erhöhte Anzahl von Störungen ist daher überwiegend auf die Abwärmanlage zurückzuführen. Insgesamt bleibt die jährliche Ausfallrate jedoch

trotzdem sehr gering. Es ergibt sich ein synthetisch generiertes Profil der maximal verfügbaren Wärmemenge wie in Abbildung 6 gezeigt. Auffällig ist jedoch, dass bei einem Ausfall, relativ gesehen zur maximal verfügbare Wärmeleistung, viel an Leistungspotential ausfällt. Dieser Umstand macht es nötig große Backupsysteme auch in kleineren lokalen Wärmenetzen zu installiert, wie das Verhältnis der Wärmebedarfspitzen zur maximal installierten Leistung in der Abbildung zeigt.

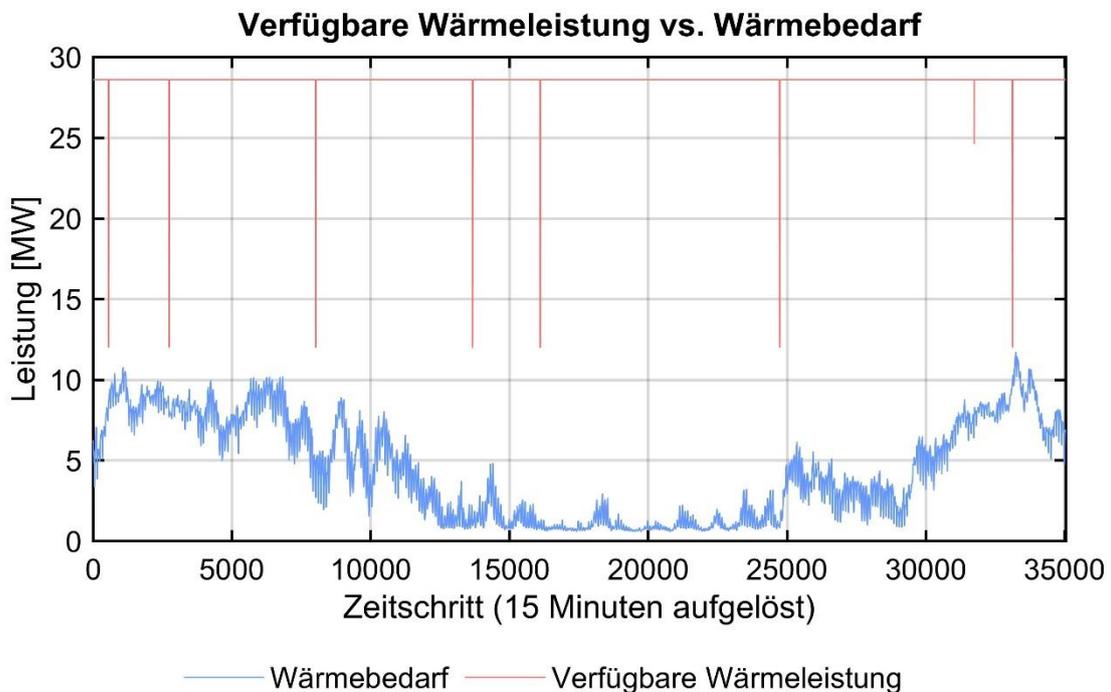


Abbildung 6: Lokales Wärmenetz - Synthetisch generiertes maximales Wärmeleistungsprofil für das Jahr 2022

4.1.3 Weitere Elemente

Aufgrund der geringen Anzahl weiterer Komponenten im beschriebenen lokalen Netz ist ein Ausfall andere Elemente als der bis jetzt beschriebenen Komponenten sehr selten. Aus diesem Grund werden keine weiteren Ausfälle für das lokale Netz angenommen.

4.2 Ausfallhäufigkeiten im ÜFWVS

Ein ÜFWVS gliedert sich grob in ein überregionales Wärmetransportnetzwerk mit Wärmequellen und den damit verbundenen Wärmekunden. Diese Wärmekunden sind meist lokale Wärmenetze, welche die Wärme an die Wärmeendkunden verteilen. In diesem Zusammenhang dient das überregionale Wärmetransportnetz für die lokalen Wärmenetze als eine Art Wärmequelle, gleichzustellen mit anderen Wärmequellen wie zum Beispiel Biomasseheizwerken oder Abwärmanlagen. Daher werden in dieser Arbeit die Ausfälle dieser Komponenten des ÜFWVS analysiert und als Versorgungsausfälle einer oder mehrere Wärmequellen (je nach Anzahl der Anschlussstellen) im lokalen Netz dokumentiert.

4.2.1 Wärmeleitungen

Wie im Kapitel 4.1.1 ergeben sich auch in den überregionalen Wärmetransportleitungen unterschiedliche Längen je Durchmessergröße. Diese und die damit einhergehenden Ausfälle sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Leitungsausfälle in den überregionalen Wärmetransportleitungen des ÜFWVS

Rohrdurchmesser	Länge in km	Ausfälle pro Jahr (statistisch [26])	Ausfälle pro Jahr (angenommen)	Ausfalldauer in h
DN ≤ 25 mm	0,292	0.113	0	0,00
DN 25 - 80 mm	9,604	1.141	1	8,00
DN 100 - 200 mm	29,843	1.726	2	16,00
DN 250 - 350 mm	124,651	1.088	1	7,50
DN ≥ 400 mm	99,641	0,000	0	0,00

Die Leitungen die basierend auf den angenommenen Ausfällen betroffen sein können, sind in Abbildung 7 gezeigt.

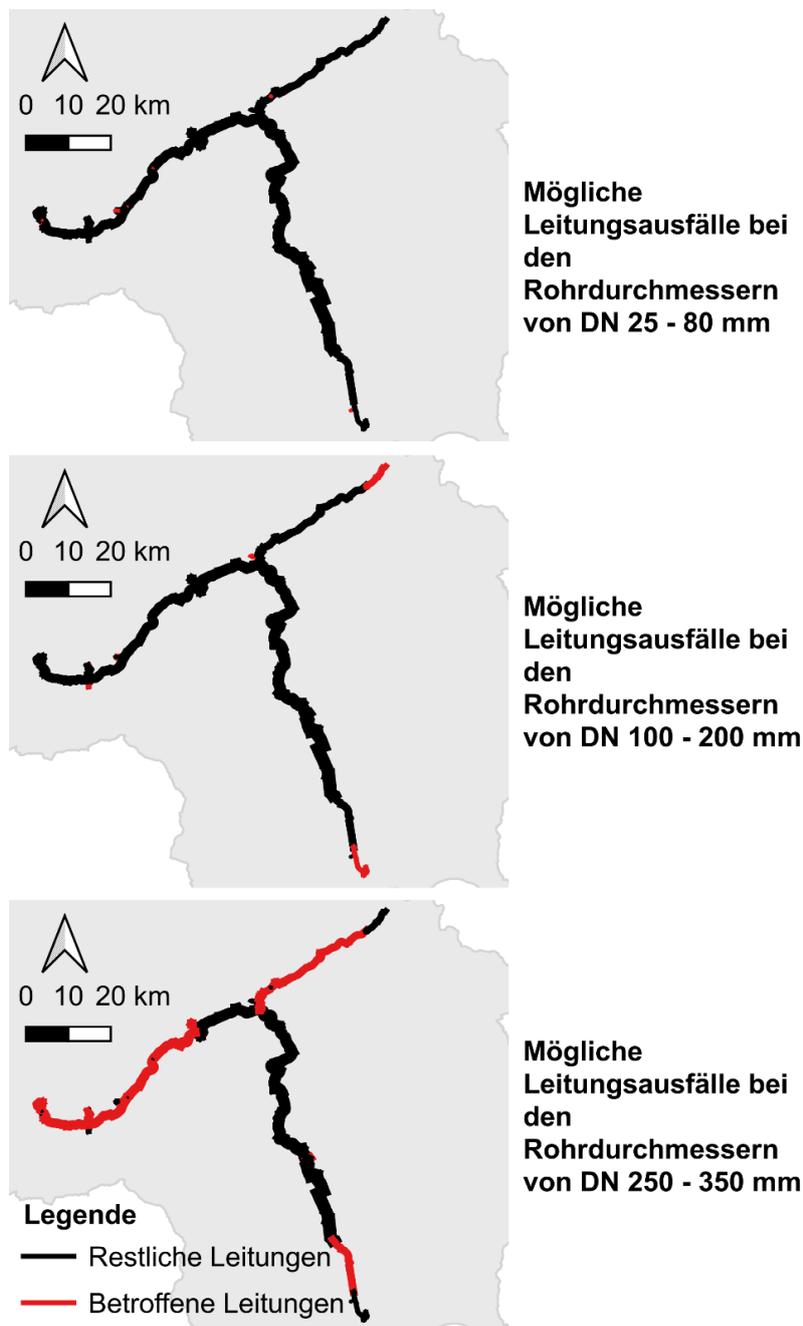


Abbildung 7: Mögliche Leitungsausfälle in den Übertragungsleitungen des ÜFWVS

Ausfälle in Leitungen mit einem Durchmesser von 25–80 mm sowie 100–200 mm haben keinen kritischen Einfluss auf das untersuchte lokale Netz, da sich das Netz im Zentrum des ÜFWVS befindet und auf große Zuleitungen mit einem Durchmesser von über 200 mm angewiesen ist. Die erste kleiner Kategorie betrifft, wie in der Abbildung zu sehen, nur Zuleitungen von sehr kleinen lokalen Netzen. Die zweite, etwas größere Kategorie von Durchmessern, betrifft hauptsächlich überregionale Wärmetransportleitungen an den Enden des ÜFWVS, an denen keine Wärmeleistungen eingespeist werden die $15 \text{ MW}_{\text{th}}$ übersteigen. Der Ausfall der in den Leitungen mit einem Durchmesser zwischen 250–350 mm stattfinden kann, kann einen kritischen Einfluss auf das gesamte ÜFWVS und auch direkt auf das untersuchte lokale Wärmenetz haben. Während einer Störung in einer dieser Leitungen ist in einem kritischen Fall damit zu rechnen, dass keine Wärme aus den überregionalen Wärmetransportleitungen in das untersuchte lokale Wärmenetz übertragen werden kann.

4.2.2 Wärmequellen

Die insgesamt installierte Wärmeleistung der im ÜFWVS befindlichen Wärmequellen übersteigt das Doppelte der Wärmebedarfsspitze, wie in Abbildung 8 ersichtlich ist. Die maximal verfügbare Wärmeleistung schwankt geringfügig im einstelligen Prozentbereich. Diese Schwankungen sind auf Produktionsschwankungen der industriellen Anlagen sowie auf unterschiedliche Ausfälle der Wärmequellen zurückzuführen. Der etwas größerer Ausfall ist auf den großen Gaskessel in Graz zurückzuführen. Im Vergleich zum lokalen Wärmenetz wären bei diesem ÜFWVS nur geringe Ausfallreserven nötig, da Ausfälle aufgrund der hohen Anzahl an Wärmequellen kaum ins Gewicht fallen. Dies ist auch der Grund, warum es möglich ist, wie bereits bei Abbildung 3 erwähnt, das beschriebene ÜFWVS, ohne Gas- und Ölkessel zu betreiben und dadurch erhebliche Mengen an CO_2 -Emissionen einzusparen.

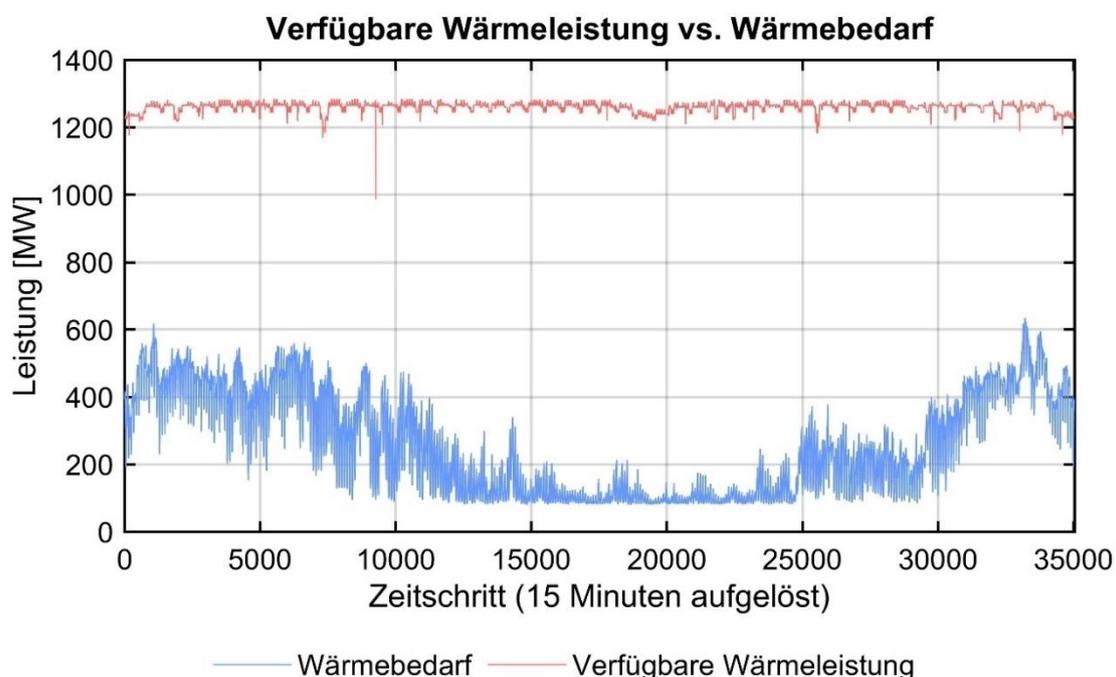


Abbildung 8: ÜFWVS - Synthetisch generiertes maximales Wärmeleistungsprofil für das Jahr 2022

4.2.3 Weitere Elemente

Aufgrund der Anzahl an Wärmepumpen und Wärmeübergabestationen ist auch bei diesen Komponenten mit einem zeitlich begrenzten Ausfall zu rechnen. Für den kritischen Fall wird

daher angenommen, dass alle in Tabelle 9 angeführten Ausfälle das lokale Wärmenetz beeinträchtigen und die Wärmebereitstellung über das ÜFWVS für diesen Zeitraum behindern. Da es jedoch ebenso wahrscheinlich ist, dass das lokale Wärmenetz nicht direkt von den Ausfällen betroffen ist, etwa weil diese in anderen Bereichen des ÜFWVS auftreten, sind im nicht kritischen Fall keine Ausfälle diesbezüglich berücksichtigt.

Tabelle 9: Weitere Komponentenausfälle in den überregionalen Wärmetransportleitungen des ÜFWVS

Ausfalltyp	Ausfälle pro Jahr (statistisch [26])	Ausfälle pro Jahr (angenommen)	Ausfalldauer in h
Wärmeübertrager	1,106	1	3,50
Umwälzpumpen	3,363	3	3,00

4.3 Ausfall von Versorgungsketten

Um den Umfang der Arbeit in einem geeigneten Rahmen zu halten, wird im Folgenden nur der Ausfall der Biomasse- und/oder der Abwärmeversorgungskette simuliert. Dies ermöglicht einen aussagekräftigen Vergleich zwischen einem lokal betriebenen Wärmenetz ohne ÜFWVS und einem lokalen Wärmenetz innerhalb eines ÜFWVS-basierten Betriebs.

4.3.1 Ausfall von Versorgungsketten: Auswirkungen auf ein lokales Netz ohne ÜFWVS

Abbildung 9 zeigt die Auswirkungen von Ausfällen in der Versorgungskette auf ein lokales Wärmenetz ohne ÜFWVS-Anbindung.

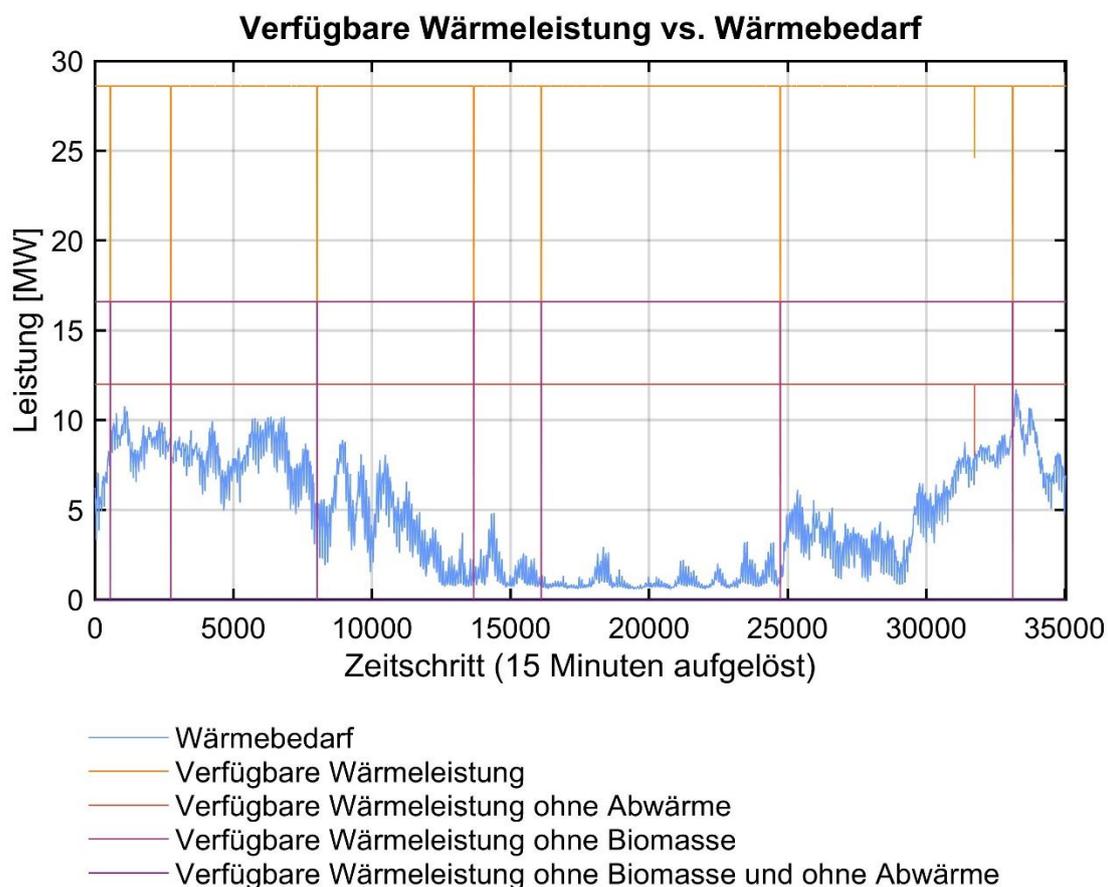


Abbildung 9: Verfügbare Wärmeleistung bei dem Ausfall von Versorgungsketten in einem lokalen Wärmenetz ohne Anbindung an ein ÜFWVS

Sowohl beim Ausfall der Biomasse als auch beim Ausfall der Abwärme kann die Wärmeversorgung größtenteils weiterhin gewährleistet werden. Allerdings ist, wie aus Abbildung 11 hervorgeht und auch in der Abbildung ersichtlich ist, in beiden Fällen mit Versorgungsausfällen zu rechnen. Beim gleichzeitigen Ausfall beider Versorgungsketten kann der Wärmebedarf jedoch nicht mehr gedeckt werden, da in diesem Szenario durchgehend keine Wärmeleistung zur Verfügung steht

4.3.2 Ausfall von Versorgungsketten: Auswirkungen auf ein lokales Netz im ÜFWVS

In Abbildung 10 sind die Auswirkungen auf die maximal verfügbare Wärmeleistung im Vergleich zum Wärmebedarf, bei Ausfall der genannten Versorgungsketten dargestellt. Aus der Abbildung geht hervor, dass die Versorgung trotz der hohen Ausfälle zu jeder Zeit sichergestellt ist.

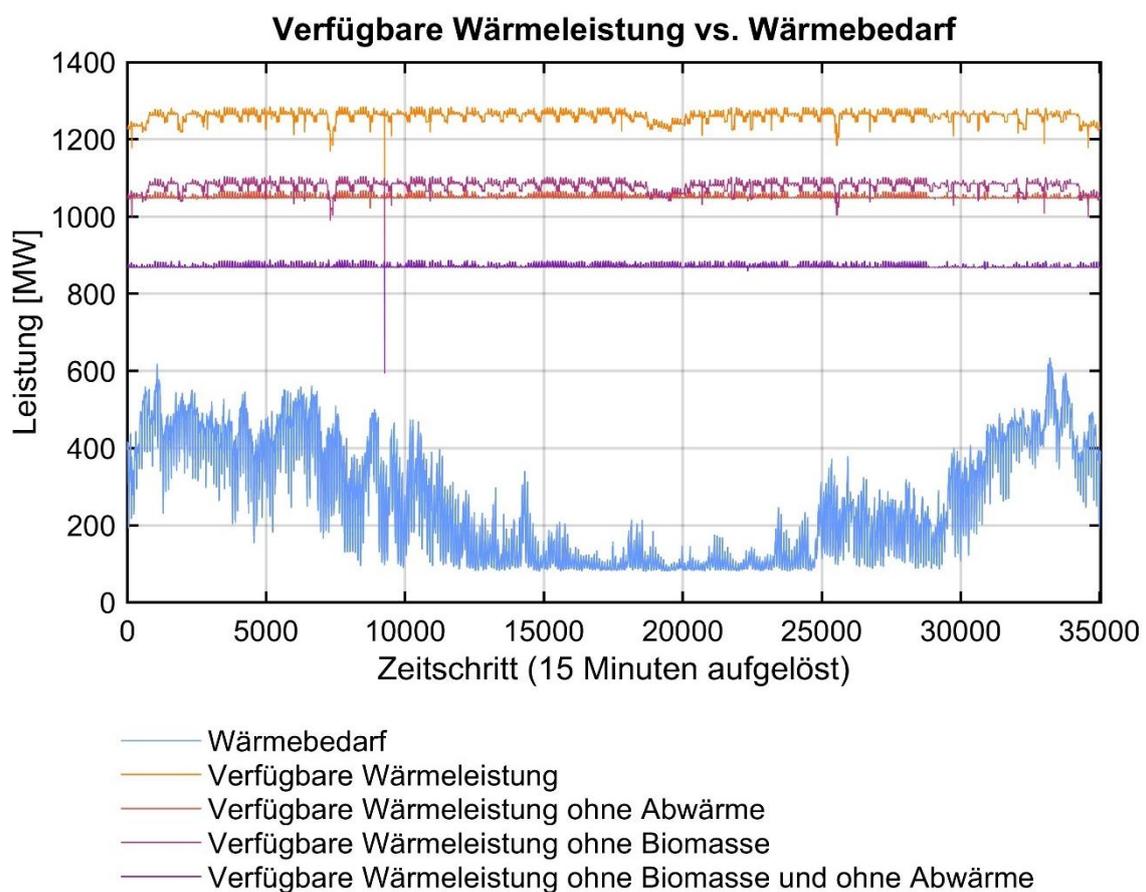


Abbildung 10: Verfügbare Wärmeleistung bei dem Ausfall von Versorgungsketten in einem ÜFWVS

4.4 Gegenüberstellung der Szenarien

Abbildung 11 veranschaulicht die in Abbildung 4 beschriebenen Szenarien im Hinblick auf die Versorgungssicherheit.

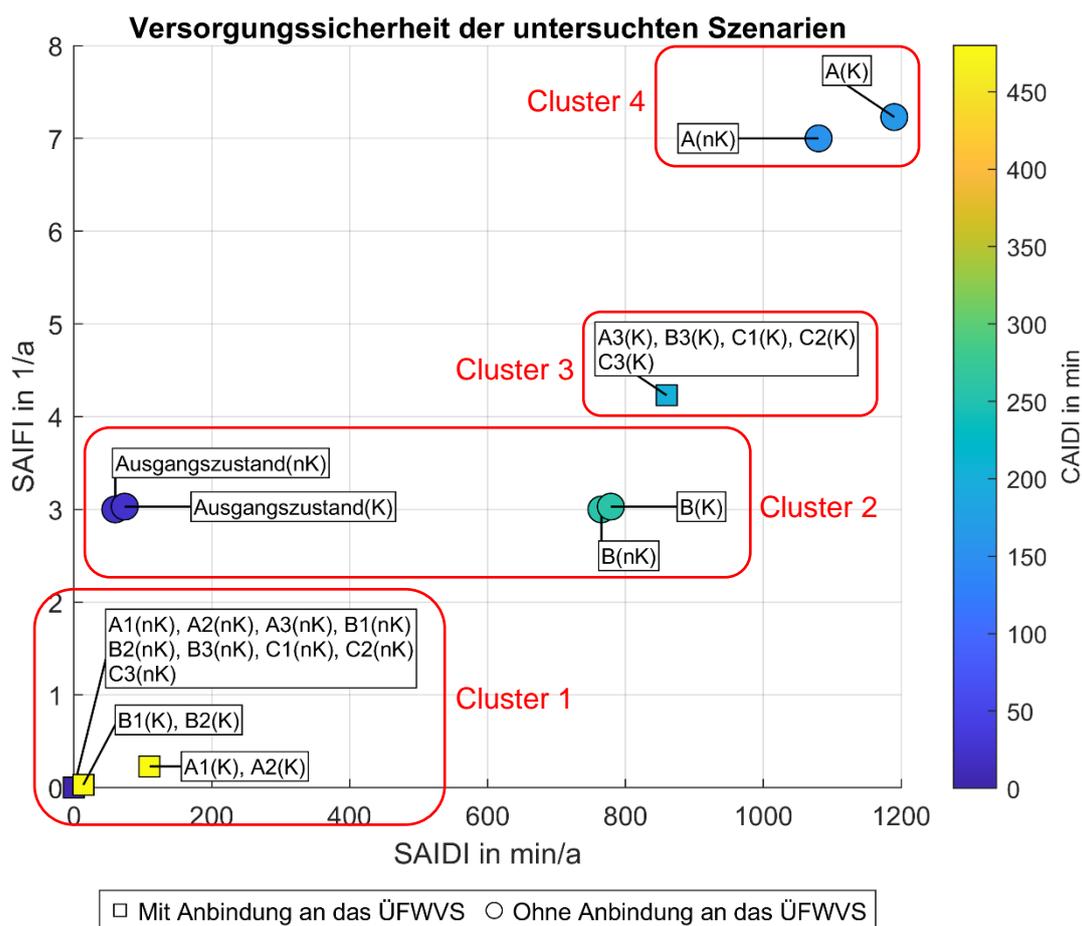


Abbildung 11: Gegenüberstellung der Szenarien bezogen auf die Versorgungssicherheit

Die Ergebnisse können, wie zum Teil im Diagramm gezeigt in fünf Versorgungs-Cluster eingeteilt werden:

- **Cluster 1:** Dieser Cluster umfasst alle Szenarien, die einen nahezu störungsfreien Betrieb gewährleisten. Dies ist nur in Fällen möglich, in denen das lokale Netz an das ÜFWVS angeschlossen ist und die Ausfälle in einer, für das betrachtete lokale Netz, nicht kritischen (nK in der Abbildung) geographischen Lage auftreten.
- **Cluster 2:** Dieser Cluster umfasst die Szenarien, in denen das lokale Netzwerk im Ausgangszustand betrieben wird, sowie diese Szenarien, in denen ein Ausfall der Abwärme-Versorgungskette eintritt. In den Szenarien des Ausgangszustandes können Ausfälle einerseits durch Leitungsausfälle im kritischen Fall (K in der Abbildung) verursacht werden, andererseits auch aufgrund kurzer Störungen in den Abwärmeanlagen, die mit gleichzeitig hohem Wärmebedarf und erheblichen Wärmeverlusten im Netz einhergehen. Interessant ist, dass bei einem Ausfall der Abwärme-Versorgungskette ähnliche Ergebnisse erzielt werden können, wie im Ausgangszustand, in dem alle Versorgungsketten zur Verfügung stehen. Der Grund dafür liegt darin, dass das Netz im letzteren Szenario hauptsächlich einseitig vom Abwärmestandort betrieben wird. Dadurch muss bei einem Ausfall dieser Wärmequelle zunächst das bereits in den Leitungen zu den Backup-Wärmequellen abgekühlte Wasser verdrängt werden, um heißes Wasser mit ausreichender Wärmequalität an die Kunden zu liefern. Diese Verzögerung führt zu schlechteren Kennzahlen und einer

verringerten Versorgungssicherheit. Mit einer geeigneten Betriebsoptimierung könnte dieser Fall jedoch vermieden werden.

- **Cluster 3:** In diesem Cluster sind alle Szenarien zusammengefasst, bei denen das lokale Wärmenetz in das ÜFWVS integriert ist und ein Totalversagen oder das Fehlen von Versorgungsstrukturen im lokalen Netz vorliegt.
- **Cluster 4:** Alle Szenarien, mit Ausnahme jener in Cluster 2, bei denen das lokale Wärmenetz nicht an das ÜFWVS angeschlossen ist und mit Ausfällen in den Versorgungsketten konfrontiert wird, fallen in dieses Cluster.
- **Cluster 5:** Die Werte für Szenario C (lokales Wärmenetz ohne Anschluss an das ÜFWVS und mit Ausfall der gesamten Versorgungskette) sind im Diagramm nicht enthalten, da diese das Gesamtbild stark verzerren würden. In diesem Szenario käme es sowohl im nicht kritischen als auch im kritischen Fall zu einem vollständigen Versorgungsausfall über das gesamte Jahr.

In Tabelle 10 sind die restlichen Metriken der beiden untersuchten Varianten gegenübergestellt.

Tabelle 10: Gegenüberstellung der Wärmenetze

Kennwerte	Einheit	Lokales Wärmenetz ohne ÜFWVS	ÜFWVS
A	%	67,53	61,36
ROP	%	12,60	26,22
SWI	-	0,68	1,47

5 Diskussion

In Bezug auf die Gegenüberstellung der Versorgungssicherheit von lokalen Wärmenetzen mit und ohne ÜFWVS lassen sich mehrere wichtige Punkte feststellen: Durch die Integration von ÜFWVS kann die Versorgungssicherheit signifikant erhöht werden. Gleichzeitig könnten Backupsysteme ohne nennenswerte Einbußen bei der Versorgungssicherheit abgebaut werden, was zu Kosteneinsparungen führen könnte. Auch ohne ÜFWVS weisen lokale Wärmenetze eine hohe Versorgungssicherheit auf, solange nicht mehrere Versorgungsketten zur Wärmegewinnung gleichzeitig ausfallen. Ein Ausfall einzelner Anlagen kann jedoch in lokalen Wärmenetzen die Versorgungssicherheit beeinträchtigen, während dies in ÜFWVS nicht der Fall ist.

Die in Abbildung 11 dargestellten Kennzahlen der unterschiedlichen Szenarien verdeutlichen, dass lokale Wärmenetze, die in ein ÜFWVS eingebunden sind, in allen Szenarien eine höhere Versorgungssicherheit bieten als isolierte Netze bei vergleichbaren Bedingungen. Während im Szenario C bei einem isoliert betriebenen lokalen Netz ein Totalausfall auftritt, kann das gleiche Netz unter den gleichen Bedingungen (C1, C2, C3) innerhalb eines ÜFWVS ohne nennenswerte Einbußen in der Versorgungssicherheit betrieben werden.

Bei der Betrachtung von Abbildung 10 lässt sich erkennen, dass in der untersuchten Region derzeit etwa doppelt so viel Wärmeleistung installiert und verfügbar ist, wie tatsächlich für die Verbrauchsspitzen benötigt wird. Dies liegt daran, dass die lokalen Netze in dieser Region größtenteils als kleinere, geschlossene Inselsysteme betrieben werden, wodurch jedes einzelne Netz etwa die doppelte Menge an installierter Leistung aufweisen muss, um auf

mögliche Ausfälle vorbereitet zu sein. Durch die Vernetzung dieser Netze könnte ein großer Teil dieser Backup-Systeme entfallen, da die gesamte Region gemeinsam eine stabilere Versorgung gewährleisten würde. Wie in dieser Arbeit gezeigt, führt die Überdimensionierung dieser Versorgungsstrukturen in lokalen Netzen bei Integration in ein Verbundsystem dazu, dass selbst der Ausfall von zwei oder mehr Versorgungsketten, abhängig von der Art der Versorgungsketten und ihrem Anteil an der Gesamtleistung, die Versorgungssicherheit nicht gefährden würde. Dies wird auch durch den hohen Shannon-Wiener-Index des ÜFWVS ersichtlich. Zudem könnte dieser Umstand einen erheblichen Beitrag zur Emissionsreduktion leisten, da emissionsintensive Anlagen, die häufig als Backup dienen, im Rahmen eines solchen ÜFWVS nicht mehr erneuert werden müssten. Auch könnten diese Anlagen aufgrund der großen Reichweite eines ÜFWVS leichter durch erneuerbare Energiequellen ersetzt werden, was den Autarkiegrad und die Erneuerbaren-Durchdringungsrate steigern könnte.

Eine weitere Erkenntnis dieser Arbeit ist jedoch, dass lokale, isolierte Wärmenetze in normalen Betriebssituationen, also nicht in Extremsituationen wie im Szenario C, eine sehr hohe Versorgungssicherheit aufweisen. Die Frage der Notwendigkeit einer noch höheren Versorgungssicherheit stellt sich jedoch trotzdem, da, wie im Jahr 2022 zu beobachten war, politische Einflüsse wie der Krieg in der Ukraine die Möglichkeit von kompletten Versorgungskettenzusammenbrüchen realistisch machen.

Durch die große Anzahl an verbundenen Wärmequellen in einem ÜFWVS lässt sich ein weiterer Effekt beobachten: Während der Ausfall einer Versorgungsanlage in einem lokalen Netz erhebliche Leistungseinbußen im Verhältnis zur insgesamt installierten Leistung verursachen kann, fällt diese Auswirkung in einem ÜFWVS aufgrund der hohen Anzahl an Versorgungsanlagen kaum noch ins Gewicht.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Integration eines ÜFWVS den Betrieb eines lokalen Wärmenetzes ohne eigene Versorgungsstruktur ermöglicht, ohne dabei wesentliche Einbußen in der Versorgungssicherheit in Kauf nehmen zu müssen. Dies könnte dazu führen, dass die lokale Versorgungsstruktur im Rahmen der Integration eines solchen ÜFWVS zurückgebaut wird, um Kosten zu senken. Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass ein gewisses Maß an Backup, idealerweise 90 % der Verbrauchsspitzen, weiterhin in den lokalen Netzen bestehen bleiben sollte, um die Versorgungssicherheit auf dem Niveau von Cluster 1 zu gewährleisten. Auf diese Weise könnten bessere Werte erzielt werden als in Szenarien ohne ÜFWVS oder in Konstellationen von lokalen Netzen innerhalb eines ÜFWVS mit geringen eigenen Versorgungsstrukturen (Cluster 2 und höher). Andernfalls könnte die Versorgungssicherheit auf das Niveau von Cluster 3 zurückfallen.

Literatur

- [1] Thomas Nussbaume, Stefan Thalmann, Andres Jenni, Joachim Ködel. Planungshandbuch Fernwärme. 1st ed. Ittigen, Bern: EnergieSchweiz Bundesamt für Energie; 2017.
- [2] Lund H, Østergaard PA, Nielsen TB, Werner S, Thorsen JE, Gudmundsson O et al. Perspectives on fourth and fifth generation district heating. Energy 2021;227:120520. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120520>.

- [3] Simon Moser, Stefan Puschnigg. Supra-Regional District Heating Networks: A Missing Infrastructure for a Sustainable Energy System. *Energies* 2021;14(12):3380. <https://doi.org/10.3390/en14123380>.
- [4] John A. Paravantis. Dimensions, Components and Metrics of Energy Security: Review and Synthesis. *SPOUDAI Journal of Economics and Business*;69(4):38–52.
- [5] Abdelrahman Azzuni, Christian Breyer. Definitions and dimensions of energy security: a literature review. *WIREs Energy & Environment* 2018;7(1). <https://doi.org/10.1002/wene.268>.
- [6] B. W. Ang, W. L. Choong, T. S. Ng. Energy security: Definitions, dimensions and indexes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015;42:1077–93. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.064>.
- [7] Vlado Vivoda. Evaluating energy security in the Asia-Pacific region: A novel methodological approach. *Energy Policy* 2010;38(9):5258–63. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.028>.
- [8] Jingzheng Ren, Benjamin K. Sovacool. Quantifying, measuring, and strategizing energy security: Determining the most meaningful dimensions and metrics. *Energy* 2014;76:838–49. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.083>.
- [9] Alfons Haber. AUSFALL- UND STÖRUNGSSTATISTIK GAS FÜR ÖSTERREICH 2023: BERICHTSJAHR 2022. E-Control 2023.
- [10] Manuel Betancourt Schwarz. Energy, economic and quality of service assessment using dynamic modelling and optimization for smart management of district heating networks: DOCTORAL THESIS. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique; Instituto superior técnico (Lisbonne) 2021.
- [11] Josef Steinegger, Andreas Hammer, Stefan Wallner, Thomas Kienberger. Revolutionizing heat distribution: A method for harnessing industrial waste heat with supra-regional district heating networks. *Applied Energy* 2024;372:123769. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123769>.
- [12] Josef Steinegger, Stefan Stering, Thomas Kienberger. Assessing the Technical and Economic Feasibility of Supra-Regional District Heating Networks 2025, in review.
- [13] Josef Steinegger, Thomas Kienberger. The impact of a novel pricing method on a supra regional district heating network. NEFI-Konferenz 2024 2024.
- [14] Josef Steinegger, Stefan Wallner, Matthias Greiml, Thomas Kienberger. A new quasi-dynamic load flow calculation for district heating networks. *Energy* 2023;266:126410. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126410>.
- [15] Wei Sun, Chumeng Ren. The impact of energy consumption structure on China's carbon emissions: Taking the Shannon–Wiener index as a new indicator. *Energy Reports* 2021;7:2605–14. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.04.061>.
- [16] Patrick Mader AW. Branchenbericht: der Österreichischen Papierindustrie; 2023.
- [17] voestalpine AG. CORPORATE RESPONSIBILITY REPORT: 2022/23. [January 28, 2025]; Available from: https://reports.voestalpine.com/2023/cr-bericht/_assets/downloads/entire-va-crb23.pdf.
- [18] APG - Austrian Power Grid. APG-Bilanz: Rekordwerte im Stromjahr 2023 belegen herausfordernde Gesamtlage. [January 28, 2025]; Available from: <https://www.apg.at/news-presse/apg-bilanz-rekordwerte-im-stromjahr-2023-belegen-herausfordernde-gesamtlage/>.

- [19] Stahl- und Walzwerk Marienhütte GmbH. Marienhütte: Facts. [January 28, 2025]; Available from: <https://www.marienhuette.at/facts/>.
- [20] Zement und Beton InformationsGmbH. Kennzahlen der Zementindustrie 2022. [January 28, 2025]; Available from: <https://www.zement.at/service/archiv/36-2022-2/420-kennzahlen-der-zementindustrie-2022>.
- [21] European Parliament and of the Council. Commission delegated regulation (EU) 2015/2402.
- [22] Commission Decision 2008/952/EC. Combined heat and power (CHP) generation: Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council.
- [23] Amt der Steiermärkischen Landesregierung. Erweiterung des thermischen Kraftwerks in Mellach durch ein Gas- und Dampfturbinen-Kombinationskraftwerk mit 1.613 MW: Kurzbeschreibung. [December 07, 2023]; Available from: https://www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/11085768_9176022/1d9c206c/Vorhabensbeschreibung_%20Mellach_.pdf.
- [24] P. Gilski, E. Krecielewska, J-M. Lucatelli, B. Bouttier, Y. Goubeyre (eds.). Probability of Failure Assessment in District Heating Networks. Proceedings from the 14th International Symposium on District Heating and Cooling (DHC14); 2014.
- [25] Mindaugas Valinčius, Inga Žutautaitė, Gintautas Dundulis, Sigitas Rimkevičius, Remigijus Janulionis, Rimantas Bakas. Integrated assessment of failure probability of the district heating network. Reliability Engineering & System Safety 2015;133:314–22. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.09.022>.
- [26] Claus Mattausch. Zuverlässigkeitsanalyse von Fernwärmenetzen [Diplomarbeit]. Graz: TU Graz; 2006.
- [27] Hubert Hopf. Fragen zur Abwärme. Online; 2024.
- [28] Hadise Rasoulia. Reliability, Availability and Resilience Assessment of Heating Systems using Sequential Monte-Carlo Simulation and Critical Load Analysis. [January 28, 2025]; Available from: https://spectrum.library.concordia.ca/id/eprint/991121/1/Rasoulia_MASc_F2022.pdf.
- [29] Stefan Pfenninger IS. Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data. Energy 2016;114:1251–65. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.060>.
- [30] Iain Staffell, Stefan Pfenninger. Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output. Energy 2016;114:1224–39. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.068>.