

Leuphana Universität Lüneburg
Sommersemester 2024

**GIS-basierte, längenoptimierte Trassenerstellung
für Wärmenetze unter Berücksichtigung
planungspraktischer Kriterien**

GIS-based, length-optimized spatial design of district heating
grids considering practical planning criteria

Bachelorarbeit

vorgelegt von
Justus Degenhardt

Matrikelnummer: XXXXX
Major: Ingenieurwissenschaften
Minor: Raumwissenschaften

Erstprüfer:in: Prof. Dr. Henrik von Wehrden
Zweitprüfer:in: Christoph Schwenck

Abgabe: 09.08.2024

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich Prof. Dr. Henrik von Wehrden und Christoph Schwenck, die diese Arbeit betreut haben, meinen Dank aussprechen. Ihre Perspektive und ihre zum Teil langjährigen wissenschaftlichen Erfahrungen haben mir geholfen, auf dem richtigen Weg zu bleiben. Zudem geht mein Dank an Rosa für das zügige Korrekturlesen dieser Arbeit. Darüber hinaus möchte ich dem Team der Thermos-Software danken, dass sie mir zeitnah einen unbegrenzten Nutzungszugang bereitgestellt haben.

Zusammenfassung

Für eine Wärmeversorgung auf Basis erneuerbarer Energien ist der Ausbau von Wärmenetzen notwendig. Eine Bewertung der Wärmenetztauglichkeit eines Gebietes kann anhand der Wärmelinien-dichte vorgenommen werden. Die dafür nötige erste, schnelle Abschätzung des Trassenverlaufes ist das Thema der vorliegenden praxisorientierten Arbeit. Anhand von Wissenschaft und Praxis wurde der Bedarf erkannt, ein schnell und einfach anwendbares Werkzeug für die Software QGIS zu erstellen, das planungspraktische Kriterien berücksichtigt. Das in dieser Arbeit erstellte Werkzeug ermöglicht auf Basis von Straßenverläufen, Flurstücksgrenzen und einem Wärmekataster eine vergleichende Untersuchung der Wärmelinien-dichte von Gebieten. Dafür wurde die Implementierung folgender Praxiskriterien demonstriert: die Erstellung der Anschlusspunkte pro Flurstück als neuer Ansatz, die Berücksichtigung eines Erschließungsgrades sowie ein Filter zur Auswahl der zu berücksichtigenden Gebäude. Ein Steinerbaum-Algorithmus wurde zur längenoptimierten Netzerstellung verwendet.

Anhand eines 0,24 km² großen Untersuchungsgebietes in Hamburg wurde die Anwendung des Werkzeugs demonstriert und mit den Ergebnissen von zwei bestehenden Wärmenetzplanungswerkzeugen und den Daten eines hypothetischen Wärmenetzes für Hamburg verglichen. Insgesamt ist der Trassenverlauf des hier entwickelten Werkzeugs ähnlich zu zwei von drei Vergleichsnetzen. Die Implementierung eines Gebäudefilters und eines Erschließungsgrades wurden als sinnvoll bewertet, da sie die Ergebnisse der planerischen Praxis annähern. Die Erstellung von einem Anschlusspunkt pro Flurstück, anstatt pro Gebäude, macht nur bei 16 % der Flurstücke einen Unterschied. Auf den beiden größten Flurstücken wird der Trassenverlauf durch diese Art der Anschlusspunkterstellung jedoch deutlich vereinfacht. Dadurch ist die Netzlänge insgesamt kürzer als bei allen drei Vergleichsnetzen.

Zudem wurde gezeigt, dass das hier entwickelte Modell schnell und einfach für die Wärmetrassenplanung nutzbar ist und auch für andere Städte angewendet werden kann, sofern die entsprechenden Geodaten vorliegen.

Summary

The expansion of district heating is necessary for a renewable energy based heat supply. The suitability of an area for a heating network can be assessed based on the linear heat density. The initial, quick assessment of the grid route required for this is the subject of this practice-oriented thesis. Based on science and practice, I recognized the research needs for creating a quick and easy-to-use tool for the QGIS software which takes practical planning criteria into account. The tool created in this thesis is designed for comparative analysis of the linear heat density of different areas. The tool uses roads, land parcels and a heat cadastre in its database. The implementation of the following practical planning criteria could be demonstrated: the creation of demand points per parcel as a new approach, the consideration that only a percentage of demand points will be connected, and a filter for selecting the buildings to be considered. A Steinerbaum algorithm was used for length-optimized network creation.

With a study area (0.24 km²) in Hamburg, the application of the tool was demonstrated and compared with the results of two existing planning tools for district heating and the data of a hypothetical grid for Hamburg. Overall, the route of the created grid is similar to two of the three comparison grids. I assessed the model features which allow to filter buildings and consider that only a percentage of the demand points will be connected, both as useful because they approximate the results of practical planning. The creation of one demand point per parcel instead of per building makes a difference for 16 % of the parcels. However, on the two largest parcels the route is significantly simplified due to this method of creating demand points. As a result, the grid length is shorter than for all three comparative grids.

The implemented model was found to be fit for grid routing of district heating networks and, if the relevant data is available, can also be used for cities other than Hamburg.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Glossar.....	VII
1 Einleitung.....	1
2 Forschungsstand.....	3
2.1 räumliche Struktur von Wärmenetzen.....	3
2.2 Stand der Wissenschaft.....	5
2.3 Stand in der Praxis.....	8
2.4 Vorhandene digitale Werkzeuge zur Wärmenetzplanung.....	10
2.5 Forschungsbedarf und Hypothesen.....	12
3 Methodik.....	15
3.1 Begründung zur Erstellung eines Modells.....	15
3.2 Untersuchungsgebiet.....	16
3.3 Design des zu erstellenden Modells.....	17
3.3.1 Steinerbaum-Algorithmus zur Netzerstellung.....	17
3.3.2 Randbedingungen und getroffene Annahmen.....	20
Gebäudeauswahl.....	20
Anschlusspunkte je Flurstück.....	21
Erschließungsgrad.....	22
Kostenbetrachtung.....	23
3.4 Umsetzung des Modells.....	23
3.4.1 Verwendete Programmierumgebung.....	23
3.4.2 Eingabedaten.....	24
3.4.3 Beschreibung des Modells.....	27
4 Ergebnisse.....	30
4.1 Erstellter Trassenverlauf.....	30
4.2 Erstellter Trassenverlauf im Unterschied zu drei Vergleichsnetzen.....	32
5 Diskussion.....	36
5.1 Diskussion der Ergebnisse.....	36
5.1.1 Diskussion von Aspekten der Hypothese A.....	36
5.1.2 Diskussion von Aspekten der Hypothese B.....	41
5.2 Anwendungsraum des erstellten Modells.....	45
6 Schluss.....	47
6.1 Fazit.....	47
6.2 Ausblick.....	48
Hilfsmittel und Quellenverzeichnis.....	50

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der Varianten von Wärmenetzhauptleitungen (Doetsch et al., 1998, Abb. 4.1).....	3
Abbildung 2: Übersicht der Varianten der Unterverteilung mit Hausanschlussleitungen: (a) Standard-Trassenführung, (b) Haus-zu-Haus-Trassenführung, (c) Einschleif-Trassenführung (Doetsch et al., 1998, S. 38).....	4
Abbildung 3: Untersuchungsgebiet in Heimfeld in Hamburg in Deutschland. Hintergrundkarten von OpenStreetMap (o. J.).....	17
Abbildung 4: Gewichtung der Katen und Erstellung der Hausanschlussleitungen in Dochev, Peters, et al. (2018, S. 415).....	18
Abbildung 5: Eingabemaske des erstellten Modells mit allen Eingabedaten und Eingabeparametern	27
Abbildung 6: Ablauf des erstellten Modells.....	29
Abbildung 7: Trassenverläufe für das Untersuchungsgebiet, erstellt mit dem hier vorgestellten Modell (a) Szenario 1: Anbindung aller Gebäude, die einen Wärmebedarf haben (b) Szenario 2: Anbindung von Gebäuden mit einer Wärmeleistung von mindestens 25 kW. Hintergrundkarten von OpenStreetMap (o. J.).....	31
Abbildung 8: Vergleich des erstellten Trassenverlaufes mit drei Referenznetzen für das Untersuchungsgebiet: (a) Trassenverlauf des hier erstellten Modells (ohne Mindestwärmewert) (b) Netz, das mit der Software City Energy Analyst erstellt wurde (c) Netz, das mit der Software Thermos erstellt wurde (d) ‚hypothetisches Wärmenetz‘ des Hamburger Wärmekatasters.....	32
Abbildung 9: (a) Ausschnitt des Trassenverlaufes bei einem Grundnetzwerk mit 3 möglichen Hausanschlussleitungen je Anschlusspunkt (b) Trassenverlauf bei einem Grundnetzwerk mit einer möglichen Hausanschlussleitung je Anschlusspunkt (c) Trassenverlauf für das ganze Untersuchungsgebiet bei einem Grundnetzwerk mit 3 möglichen Hausanschlussleitungen je Anschlusspunkt. Hintergrundkarten von OpenStreetMap (o. J.).....	37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht aller Geodaten und Parameter, die das Modell erwartet (linke Spalte); für diese Arbeit verwendete Werte beziehungsweise Geodaten (rechte Spalte).....	26
Tabelle 2: Übersicht der Ergebnisse für das Untersuchungsgebiet. Für alle Netze wurden die gleichen Wärmebedarfe, basierend auf (Dochev et al., 2020), angenommen.....	34

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ALKIS®	Amtliches Liegenschaftsinformationskataster
AOI	area of interest, Untersuchungsgebiet
BUKEA	Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft Hamburg
CEA	City Energy Analyst (Wärmeneztplanungssoftware)
GIS	Geoinformationssystem(e)
GRASS	Geographic Resources Analysis Support System
KBS	Koordinatenbezugssytsm
MST	Minimaler Spannbaum (minimal spanning tree)
OSM	OpenStreetMap
Thermos	Thermal Energy Resource Modelling and Optimisation System (Wärmeneztplanungssoftware)

Glossar

Begriff	Bedeutung
Anschlusspunkt	Der Anschlusspunkt markiert den Ort der Übergabestation. „Die Übergabestation ist das Bindeglied zwischen der Hausanschlussleitung und der Hauszentrale. Sie dient der vertragsgemässen Übergabe der Wärme und der Messung des Wärmebezuges.“ (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 215)
(Haus-)Anschlussleitung	„Verbindungsleitung zwischen Wärmeverteilnetz und Übergabestation“ (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 213)
QGIS	open-source Geoinformationssoftware
Trasse	„Die Trasse ist der für die Führung der Fernwärmeleitung erforderliche Geländebereich.“ (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 215)
Trassenführung, Trassenverlauf	Räumlicher Verlauf der Trassen
Wärmebedarf, Nutzwärmebedarf	„Der <u>Nutzwärmebedarf</u> setzt sich zusammen aus dem Bedarf für Heizwärme und Warmwasser. <u>Nutzwärmebedarfskennwerte</u> werden auf Basis von Parametern der Gebäudecharakteristik berechnet und sollen den energetischen Gebäudestandard widerspiegeln.“ (Behörde für Umwelt und Energie Hamburg, 2019, S. 8) Der <u>Wärmeverbrauch</u> hingegen ist der tatsächlich gemessene Verbrauch.
Wärmebezugsdichte	Quotient aus Wärmebedarf pro Jahr und Fläche des Versorgungsgebietes
Wärmelinien-dichte	Quotient aus Wärmebedarf pro Jahr und dafür benötigter Netzlänge
Wärmequelle, Quellpunkt	Ort, an dem die Wärme in das Netz eingespeist wird
Wärmesenke, Verbraucher, Wärmeabnehmer	Ort, an dem die Wärme dem Netz entzogen wird, zum Heizen oder zur Warmwasserbereitung

1 Einleitung

Zur Senkung der Treibhausgasemissionen in Deutschland müssen sich der Energiesektor und damit auch die Wärmeversorgung verändern, da die Wärmeversorgung 65 % des gesamten deutschen Energieverbrauches in 2021 (UBA, 2024) ausmachten. Diese Veränderung von nicht erneuerbaren hin zu erneuerbaren Energiequellen wird als Wärmewende bezeichnet. Obwohl die Energie für Wärme- und Kälteerzeugung in Deutschland derzeit noch zu mehr als 80 % aus nicht erneuerbaren Quellen stammt (Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) am Umweltbundesamt, 2024, S. 11), gab es in den letzten Jahren in Deutschland wenig öffentliche Aufmerksamkeit für eine Umstellung auf nachhaltige Wärmeversorgung. Das hat sich mit dem Krieg in der Ukraine geändert, was sich im neuen Wärmeplanungsgesetz (WPG, 2024) aus dem Dezember 2023 widerspiegelt. Forschung und Politik sind sich weitestgehend einig, dass Wärmenetze für die Wärmewende eine wichtige Technologie sind (Clausen et al., 2022, S. 22; Erdmann et al., 2021, S. 30; Maaß, 2021, S. 23). Zentral für eine klimaneutrale Wärmeversorgung durch Wärmenetze sind die Dekarbonisierung und der Ausbau der Netze (Engelmann et al., 2021, S. 22). Auf Bundesebene wurde das Ziel angekündigt, mittelfristig mindestens 100.000 Gebäude pro Jahr neu an ein Wärmenetz anzuschließen (*Mehr Tempo bei der Transformation der Wärmeversorgung Wärmenetze klimaneutral um- und ausbauen*, 2023). Der Ausbau und die Dekarbonisierung von Wärmenetzen sind auf Bundesebene durch das Wärmeplanungsgesetz (WPG, 2024) und in Hamburg durch das Hamburgische Gesetz zum Schutz des Klimas geregelt. Letzteres verpflichtet Wärmenetzbetreibende bis 2027 einen Ausbaufahrplan vorzulegen (HmbKliSchG, 2020, § 10 Abs 1). Einem großen Ausbaupotenzial in Hamburg (Dochev, Peters, et al., 2018, S. 417) stehen bundesweit hohe Investitionskosten und Raumbedarfe für Wärmenetze hemmend entgegen (Engelmann et al., 2021, S. 354). Daher ist eine gute räumliche Planung bedeutend (Schmidt & Stange, 2021, S. 97). Hierbei ist die netzlängenbezogene Wärmelinien-dichte ein Indikator für die Wärmenetztauglichkeit eines Gebietes (Dénarié et al., 2021, S. 65; Dochev, Peters, et al., 2018, S. 418; Erdmann et al., 2021, S. 233). Je höher die Wärmelinien-dichte ist, desto höher ist die Wärmenetztauglichkeit. Zur Berechnung der Wärmelinien-dichte werden die Wärmebedarfe der Gebäude und die Länge des zu planenden Netzes benötigt. Die Wärmelinien-dichte ist ein zentraler Indikator für die Wärmenetztauglichkeit, weil die hohen Investitionskosten vor allem von der Netzlänge (Lumbreras et al., 2022, S. 11) und die Einnahmen von der zu verkaufenden Wärmemenge abhängen. Die vorliegende Arbeit behandelt die Abschätzung der Netzlänge zum Zweck der Wärmelinienberechnung mithilfe eines zu erstellende GIS-Werkzeugs. Die Wärmebedarfe dafür sind für Hamburg als Geodaten bereits frei verfügbar (Freie und Hansestadt Hamburg Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft, 2018).

Zudem können Wärmenetzbetreibende die Wärmelinien-dichte und damit das Netz nur durch die Minimierung der Trassenlänge verbessern, vorausgesetzt alle Gebäude eines Gebietes sollen an das Wärmenetz angeschlossen werden. Wenn nicht alle Gebäude an das Netz angeschlossen werden sollen, kann die Wärmelinien-dichte über die Auswahl der anzuschließenden Gebäude optimiert werden. Die Optimierung durch eine Gebäudeauswahl ist nicht der Mittelpunkt der Arbeit. Im Fokus der Arbeit steht die längenoptimierte Trassenplanung, womit zur Beschleunigung der Dekarbonisierung der Wärmeversorgung beigetragen werden soll. Als Untersuchungsgebiet wurde Hamburg, als zweitgrößte Stadt in Deutschland (Statistisches Bundesamt, o. J.), gewählt. Denn vor allem in Ballungsgebieten sind Wärmenetze für die Energiewende bedeutsam (Hansen & Gudmundsson, 2018, S. 3; Purr et al., 2019, S. 173).

Im Kapitel [2 Forschungsstand](#) wird ein Überblick zum Forschungsfeld gegeben, es werden das Planungsvorgehen in der Praxis aufgezeigt und bestehende Planungswerkzeuge vorgestellt. Darauf aufbauend werden im Kapitel [2.5 Forschungsbedarf und Hypothesen](#) die Ziele dieser Arbeit festgelegt. Im Methodikteil [3 Methodik](#) der Arbeit werden zunächst im Kapitel [3.3 Design des zu erstellenden Modells](#) der Steinerbaum-Algorithmus zur Netzerstellung und die Randbedingungen des zu erstellenden Modells erklärt. Das Kapitel [3.4 Umsetzung des Modells](#) enthält die Erläuterung zur Algorithmisierung des Modells, zu den verwendeten Geodaten sowie zu den internen Prozessschritten des erstellten Modells. Im Kapitel [4 Ergebnisse](#) werden die Ergebnisse für die beispielhafte Anwendung des Modells beschrieben. Die Diskussion der Ergebnisse folgt anschließend im Kapitel [5 Diskussion](#). Abschließend werden im letzten Kapitel [6 Schluss](#) die zentralen Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und die weiteren Forschungsbedarfe aufgezeigt.

2 Forschungsstand

Nachdem in der Einleitung das Thema eingegrenzt wurde, werden hier die Grundlagen zum Trassenverlauf von Wärmenetzen vorgestellt. Anschließend werden die Fragen geklärt, was der Stand der Wissenschaft und der Stand der Praxis zum Thema Wärmenetzplanung ist und welche digitalen Werkzeuge es gibt. Darauf aufbauend werden die Hypothesen für die Arbeit festgelegt.

2.1 räumliche Struktur von Wärmenetzen

Im Wärmeplanungsgesetz (WPG, 2024, § 3, Abs. 1, Nr. 17) wird ein Wärmenetz definiert als „eine Einrichtung zur leitungsgebundenen Versorgung mit Wärme, die kein Gebäudenetz [...] ist“. Ein Gebäudenetz wäre ein Netz zur Wärme-/Kälteversorgung, das maximal 16 Gebäude versorgt (GEG, 2024, § 3, Abs. 1, Nr. 9a). In anderen Definitionen wird oft zusätzlich benannt, dass als Wärmeträgermedium in Wärmenetzen Wasser oder Dampf verwendet werden (siehe: *Der Begriff der Fernwärme*, o. J.; Topp, 2009, S. 134; Wack et al., 2023, S. 1). In dieser Arbeit werden die Begriffe ‚Wärmenetz‘ (gesetzlicher Begriff) und ‚Fernwärme‘ (allgemeiner Begriff) synonym verwendet.

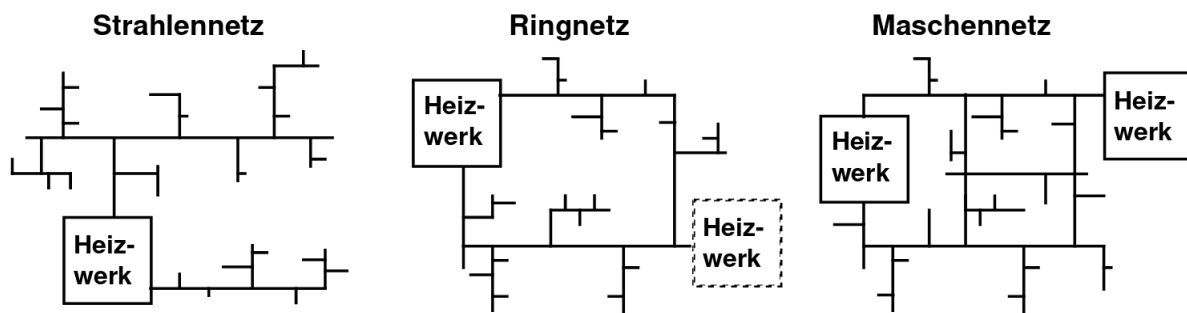


Abbildung 1: Übersicht der Varianten von Wärmenetzhauptleitungen (Doetsch et al., 1998, Abb. 4.1)

Wie in der Einleitung eingegrenzt, liegt der Fokus der Arbeit auf längenoptimierten Wärmenetzen, also auf der räumlich optimierten Trassenführung. Diese Trassenführung basiert auf der Netzstruktur der Hauptleitungen, die große Mengen Wärme transportieren, und auf der Struktur der Unterverteilung und Hausanschlüsse, die die Wärme weiter verteilen. Für ein besseres Verständnis werden diese Strukturen hier kurz erläutert.

Bei den Hauptleitungen gibt es drei Varianten: Strahlennetz, Ringnetz und Maschennetz (siehe [Abbildung 1](#)). Das Strahlennetz ist für kleine und mittelgroße Netze geeignet und hat den Vorteil einer geringen Netzlänge (Doetsch et al., 1998, S. 37). Das Ringnetz ist durch seine höhere Netzlänge und größeren Durchmesser teurer; dafür bietet es eine höhere Versorgungssicherheit und ist leicht erweiterbar (Doetsch et al., 1998, S. 37). Das Maschennetz wird für große Netze

verwendet, ist ebenfalls leicht erweiterbar und hat eine noch höhere Versorgungssicherheit, allerdings hat es hohe Investitionskosten (Doetsch et al., 1998, S. 37).

Bei der Unterverteilung mit den Hausanschlussleitungen werden drei Arten unterschieden: Standard-Trassenführung, Haus-zu-Haus-Trassenführung und Einschleif-Trassenführung (siehe [Abbildung 2](#)) (Doetsch et al., 1998, S. 38–39). Die oft angewendete Standard-Trassenführung bindet jedes Gebäude mit einer eigenen Anschlussleitung an das Netz an (Doetsch et al., 1998, S. 38). Dadurch werden viele Abzweigungen, Formstücke und längere Rohrleitungen benötigt, weshalb diese Variante teurer ist als andere, andererseits bietet sie die größte Flexibilität (Doetsch et al., 1998, S. 38; Nussbaumer, Thalman, Jenni, et al., 2021, S. 82). Bei der Haus-zu-Haus-Trassenführung werden mehrere Häuser über eine Leitung versorgt, wodurch weniger Abzweige entstehen, aber dafür Durchleitungsrechte durch private Grundstücke nötig sind (Nussbaumer, Thalman, Jenni, et al., 2021, S. 82). Die Keller-Verlegung ist ein Sonderfall der Haus-zu-Haus-Trassenführung, bei der die Rohre direkt von Keller zu Keller verlegt werden, was

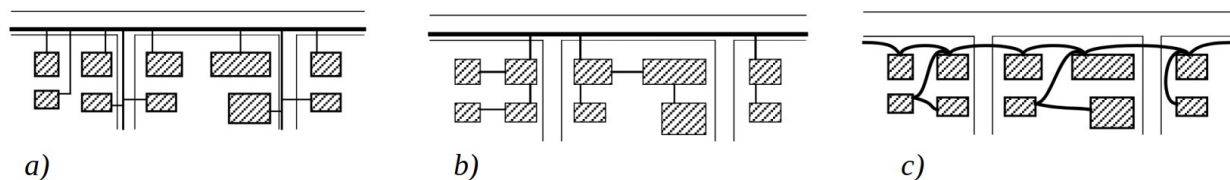


Abbildung 2: Übersicht der Varianten der Unterverteilung mit Hausanschlussleitungen: (a) Standard-Trassenführung, (b) Haus-zu-Haus-Trassenführung, (c) Einschleif-Trassenführung (Doetsch et al., 1998, S. 38).

nur bei aneinandergrenzenden Gebäuden oder Tiefgaragen möglich ist (Doetsch et al., 1998, S. 42–43). Vorteilhaft bei der Haus-zu-Haus-Trassenführung ist die preiswerte Verlegung durch den Wegfall von Tiefbaukosten; nachteilig ist der hohe Koordinationsaufwand durch die Abstimmung mit den Hauseigentümer:innen und durch die einzelnen Bauabschnitte (Nussbaumer, Thalman, Jenni, et al., 2021, S. 82). Als dritte Methode gibt es die Einschleif-Trassenführung, die jedoch laut Doetsch et al. (1998, S. 39) seltener verwendet wird und alle Häuser über eine Haus-zu-Haus-Trassenführung anbindet und dabei auf Hauptleitungen verzichtet (Doetsch et al., 1998, S. 39).

Da in den folgenden Kapiteln oft der Begriff ‚Modell‘ verwendet wird, sei hier kurz erwähnt, dass diesem hier ein informatischer Modellbegriff zugrunde liegt. Dabei wird sich auf das Verständnis von Bungartz et al. (2009, S. 5) berufen, die ein Modell als allgemeine, vereinfachende Abbildung von einem Teil der Realität verstehen.

2.2 Stand der Wissenschaft

Mit dem Wissen über die Grundlagen von Wärmenetzen zeigt dieses Kapitel, was der aktuelle Forschungsstand in der Wissenschaft zur Wärmenetzplanung ist. Dazu werden verwendete Programmiersprachen und Softwares dargestellt und berücksichtigte Kostenaspekte und Besonderheiten der Publikationen aufgezeigt.

Die Forschung zur räumlichen Wärmetrassenplanung steht laut Dénarié et al. (2021, S. 75) noch am Anfang. Wie das Aufkommen vieler GIS-basierten Werkzeuge zur Wärmeplanung in den letzten Jahren (Dochev, Peters, et al., 2018, S. 411) zeigt, entwickelt sich das Forschungsfeld stark. Die meiste Literatur fokussiert sich auf den Wärmenetzausbau in Gebieten, wo es bisher kein Wärmenetz gibt (Lumbreras et al., 2022, S. 2) und nicht auf die Nachverdichtung. Bei der dafür notwendigen Berechnung eines möglichen Trassenverlaufes lassen sich zwei Ansätze in der Wissenschaft unterscheiden: einerseits großräumige Analysen für ganze Regionen und Länder und andererseits kleinräumige Planungen einzelner Netze (Dénarié et al., 2021). Diese Arbeit beschäftigt sich mit der kleinräumigen Planung. Dafür wurden wissenschaftliche Publikationen gesichtet, die sich auf die Optimierung von Trassenverläufen fokussieren, basierend auf ökonomischen sowie thermisch-hydraulischen Aspekten. Es wurden bevorzugt Artikel berücksichtigt, die open-source GIS-Software verwendeten. Aufgrund der begrenzten Projektlaufzeit werden Publikationen zu weiteren Planungsaspekten, in dieser Arbeit nicht behandelt.

Einerseits wurde in den gelesenen Publikationen die Software QGIS verwendet (Dénarié et al., 2021; Dochev, Peters, et al., 2018; Lumbreras et al., 2022; Salenbien et al., 2023; Schmidt & Stange, 2021), andererseits wurden oft Python-basierte Algorithmen verwendet. Zu letzterem zählen die Pakete DHNx (Röder et al., 2021) und networkX (Fuchs et al., 2016, S. 481) sowie das stärker modellierungsorientierte Paket usegraph¹ (Fuchs & Müller, 2018). In einem Artikel wurde zudem MATLAB verwendet (Wack et al., 2023).

In der Mehrheit der untersuchten Publikationen wird eine ökonomische Analyse durchgeführt, deren Detaillierungsgrad variiert. Häufig wird die Netzlänge als Variable in die Berechnungen einbezogen. Um die Bandbreite der Ansätze zu veranschaulichen, werden im Folgenden einige Beispiele aufgeführt: Esch et al. (2011, S. I) führen eine detaillierte Betrachtung durch, indem für die Investitionskosten unter anderem Aufwendungen für Wärmetrassen und Hausübergabestationen berücksichtigt werden. Röder et al. (2021, S. 9) berechnen die Kosten basierend auf der Netzlänge und auf den Durchmessern der Rohre. Lumbreras et al. (2022, S. 5) gehen davon aus, dass es für eine erste Machbarkeitsbetrachtung reicht, die Kosten für Rohre und Bauarbeiten zu betrachten, da

¹<https://github.com/RWTH-EBC/uesgraphs>

dies die relevantesten Kosten seien. Dort werden auf Basis dieser Kosten die Amortisationsdauer und der Kapitalwert ermittelt. Die beiden Kennwerte sind ebenfalls abhängig von der Netzlänge. Es bleibt folglich festzuhalten, dass die ökonomische Machbarkeit mit verschiedenen Parametern bewertet werden kann und oft abhängig von der Netzlänge berechnet wird.

Im Folgenden wird auf die Besonderheiten der einzelnen Artikel eingegangen, geordnet vom Allgemeinen zum Speziellen: Ein grundlegender GIS-basierter Ansatz der kommunalen Wärmeleitplanung wird von Erdmann et al. (2021) beschrieben. In dem Artikel wird mit einem multikriteriellen Ansatz analysiert, wie geeignet Stadtgebiete für eine Fernwärmeversorgung sind. Diese Analyse wird einerseits auf der Ebene der einzelnen Gebäude durchgeführt und andererseits auf der großräumigeren Ebene von erstellten Rasterzellen mit $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ (Erdmann et al., 2021, S. 229). Auf der Gebäudeebene wird für jedes Gebäude anhand von fünf Kriterien bewertet, wie passend es für eine der folgenden, nachhaltigen Wärmetechnologien ist: Biomassekessel, Wärmepumpe, Wärmenetz oder unter Umständen Gaskessel mit Biogas oder mit Wasserstoff aus Strom aus erneuerbaren Energien (Erdmann et al., 2021, S. 230–231). Die Kriterien zur Bewertung sind das Autarkiepotenzial des Gebäudes, das Heizungsalter, der spezifische Wärmebedarf, möglicher Denkmalschutz des Gebäudes und die Dezentralität des Gebäudes (Erdmann et al., 2021, S. 232). Je nach Heiztechnologie haben die Kriterien eine unterschiedliche Gewichtung. Mit einem Erfüllungsgrad für die verschiedenen Kriterien ergibt sich für jedes Gebäude eine priorisierte Heiztechnologie. Auf Rasterzellenebene wird ähnlich vorgegangen: Für jede Rasterzelle wird anhand der aggregierten Gebäudemerkmale eine priorisierte Heiztechnologie errechnet (Erdmann et al., 2021, S. 231). Die Kriterien auf der Rasterebene sind: Wärmelinienichte, Heizungsalter, Anteil denkmalgeschützter Gebäude und Anteil dezentral zu versorgender Gebäude (Erdmann et al., 2021, S. 233). Die Ergebnisse beider Ebenen sind ein erster Planungsschritt und Grundlage, um mit einem multikriteriellen Ansatz einen Rahmen für die Transformation der Wärmeversorgung von Quartieren und Stadtteilen abzustecken (Erdmann et al., 2021, S. 231).

Literatur zu späteren Planungsphasen, in denen die Abwägung anderer Heiztechnologien bereits durchgeführt wurde, ist ebenfalls vorhanden: Lumbreras et al. (2022) konzentrieren sich auf die ökonomische Machbarkeit und eine Sensitivitätsanalyse für ein Wärmenetz. Dort wird das Wärmenetz hinsichtlich der Einbindung einer industriellen Abwärmequelle optimiert (Lumbreras et al., 2022, S. 11). Das Untersuchungsgebiet von etwa 7 km^2 wird in kleinere Gebiete zerlegt, für die die Wärmetrassen einzeln berechnet werden (Lumbreras et al., 2022, S. 2–3). Schmidt und Stange (2021) verwenden ähnliche Kriterien, aber das Netz wird als Ganzes ausgelegt. Hier steht auch stärker die Optimierung des Netzes und nicht die Analyse im Vordergrund. Nichtsdestotrotz beinhalten die Ergebnisse neben dem räumlichen Trassenverlauf ökonomische Kennwerte wie die

Jahreskosten und den Kapitalwert (Schmidt & Stange, 2021, S. 103). Schmidt und Stange haben ihr Modell als QGIS-Plugin entwickelt, das für ein Untersuchungsgebiet den kostenoptimalen Trassenverlauf bestimmt. Die Optimierung berücksichtigt sowohl thermische als auch hydraulische Aspekte.² Das Ziel ist die Entscheidungsunterstützung in der Planung (Schmidt & Stange, 2021). Dafür sind noch weitere Verbesserungen vorgesehen, wie zum Beispiel eine Schnittstelle zu Softwares von vor-/nachgelagerten Planungsschritten (Schmidt & Stange, 2021, S. 103). Mit dem Thema der Schnittstellen bei Planungssoftwares für Wärmenetze beschäftigt sich die Masterarbeit von Höffner (2022).

Wie Schmidt und Stange (2021) erstellen auch Wack et al. (2023) ein optimiertes Netz innerhalb definierter Gebietsgrenzen. Optimiert werden dabei sowohl der Trassenverlauf als auch die Durchmesser der Rohre hinsichtlich eines idealen Kapitalwertes (Wack et al., 2023, S. 7, 8). Ein Ergebnis ist, dass sich die ökonomischen Eingabeparameter auf die Trassenführung auswirken, beispielsweise werden mehr Häuser angeschlossen, wenn die Wärmeentstehungskosten niedriger sind (Wack et al., 2023, S. 8). Ähnliche Themen werden im Folgeartikel (Salenbien et al., 2023) der gleichen Autor:innen behandelt.

Dénarié et al. (2021) legen den Fokus auf die Annäherung der Netzlänge für große, nicht erschlossene Gebiete. Untersucht wird die Korrelation zwischen der Wärmeliniendichte und dem Bebauungsgrad (bebaute Fläche dividiert durch die Fläche des versorgten Gebietes), wodurch sich große Gebiete schnell bewerten lassen (Dénarié et al., 2021, S. 59, 75). Die Ergebnisse zeigen, dass die Korrelation je nach Land unterschiedlich sind und die Abschätzung der Netzlänge umso genauer ist, je größer der Anteil für Fernwärme geeigneter Häuser ist (Dénarié et al., 2021, S. 59). Auch Dochev, Peters, et al. (2018) legen den Schwerpunkt auf die Berechnung der Wärmeliniendichte als Ersatzkennwert für die ökonomische Machbarkeit. Ziel der Arbeit ist die Bewertung von Stadtgebieten bezüglich ihrer Wärmenetzzeignung. Dafür werden einerseits die Wärmebedarfe der Gebäude berechnet und andererseits ein längenoptimaler Trassenverlauf erstellt (Dochev, Peters, et al., 2018). Für die Trassenerstellung werden Gebäude gruppiert und für jede Gebäudegruppe wird ein Netz erstellt, wodurch eine hochaufgelöste Bewertung der Wärmenetzpotenziale möglich ist (Dochev, Peters, et al., 2018, S. 414). Auch wenn wichtige Aspekte bezüglich des Baus der Netze vernachlässigt wurden (beispielsweise Differenzierung der Kosten nach Verlegeart der Rohre) hat die Netzlänge eine gute Übereinstimmung Netzlängen mit bestehenden Wärmenetzen (Dochev, Peters, et al., 2018, S. 418). Die verwendeten Python-Skripte für QGIS sind frei zugänglich unter (Dochev, 2018/2021).

2 Modell von Schmidt und Stange (2021)
https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/gewv/forschung/forschungsprojekte/mldh/download_mldh

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in den letzten Jahren viele neue GIS-basierte Methoden für die Wärmeplanung entstanden sind (Dochev, Peters, et al., 2018, S. 411). In der gesichteten Literatur basieren die Methoden oft auf Python oder QGIS. Die Publikationen haben unterschiedliche Fokusse, zentral ist aber immer die Analyse der (größtenteils ökonomischen) Machbarkeit, unter Berücksichtigung thermischer und hydraulischer Kriterien mit Fokus auf dem Leitungsbau. Wie die Untersuchung von Ausbaugebieten in der Praxis aussieht, wird im folgenden Kapitel thematisiert.

2.3 Stand in der Praxis

Neben den Betrachtungen in wissenschaftlichen Publikationen ist die Umsetzung der Wärmenetzplanung in der Praxis von Interesse. Wie ein Vorgehen zur Erschließung neuer Gebiete prinzipiell aussehen könnte, enthält das Planungshandbuch Fernwärme (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 105–110), das im Auftrag des schweizerischen Bundesamtes für Energie erstellt wurde, aber auch Hinweise für die Planung in Deutschland enthält. Die Erschließung neuer Gebiete wird dort in sechs Phasen unterteilt. Welche Rolle das Erstellen eines Trassenverlaufes dabei einnimmt, soll im Folgenden dargelegt werden. Die erste Phase ist die Vorstudie. Hierbei wird das potenzielle Versorgungsgebiet anhand der Wärmebezugsdichte festgelegt (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 105–110). Die erste Phase enthält auch eine erste Wirtschaftlichkeitsbetrachtung basierend auf den Wärmegestehungskosten und der Wärmelinien-dichte (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 105–109). Des Weiteren wird entschieden, welche Kleinverbraucher angeschlossen werden können; zudem werden die Wärmeverluste berechnet (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 105–110). Auf Basis der Kostenschätzung, die eine Genauigkeit von etwa $\pm 25\%$ hat, wird entschieden, ob das Projekt weitergeführt werden soll (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 105–110). In der zweiten Phase (Entwurfsplanung) werden die großen und kleinen Wärmeabnehmer konkretisiert, um daraufhin das Versorgungsgebiet final festzulegen (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 105–110). Unter anderem wird nun der Trassenverlauf aus der Vorstudie verfeinert und detaillierter geplant (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 105–110). Die dritte Phase beinhaltet die Planung, Ausschreibung und Vergabe des Projektes, wobei das Netz auch technisch bis ins Detail geplant wird (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 105–110). In der vierten Phase wird das Wärmenetz gebaut. Die Phasen fünf und sechs beinhalten den Betrieb und die Betriebsoptimierung sowie die Instandhaltung des Systems (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 105–110).

Neben dem Planungshandbuch Fernwärme gibt es den, von den Bundesministerien für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) sowie für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) in

Auftrag gegebenen, Leitfaden Wärmeplanung (Ortner et al., 2024). Dieser umfasst nicht nur die Wärmenetzplanung, sondern die gesamte Wärmeplanung in einem zwölfschrittigen Prozess von der internen Organisation und Akteursanalyse bis zur Veröffentlichung des finalen Wärmeplans. Auch hier wird die Wärmelinien-dichte zur Bewertung der Wärmenetzeignung herangezogen (Ortner et al., 2024, S. 53, 54, 82). Da der Leitfaden Wärmeplanung erst im Sommer 2024 erschienen ist, konnte er in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt werden.

Aus den Zielen der Stadt Hamburg zum Klimaschutz und dem notwendigen Ausbau der leitungsgebundenen Wärmeversorgung folgt, dass zukünftig viele Gebiete erschlossen werden, in denen bisher keine Fernwärme angeboten wird. Die Beurteilung neuer Gebiete kann unterstützt werden, indem die ansonsten händisch durchgeführte, zeitaufwendige und teure Erstellung des Trassenverlaufs automatisiert wird (Jebamalai et al., 2019, S. 487). Diese Arbeit fokussiert daher die Berechnung der Wärmelinien-dichte im Zuge der Vorstudie. Zur dafür notwendigen ersten Abschätzung eines möglichen Trassenverlaufes seien gemäß eines Wärmeversorgers folgende Kriterien sinnvoll: Erstens bestehe eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass ein Anschlusspunkt zur Beheizung mehrere Gebäude verwendet werden könne, wenn die Liegenschaften auf einem Flurstück liegen. Zweitens können laut dem Wärmekataster der Stadt Hamburg (BUKEA Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft. Amt für Energie und Klima. Abteilung Energierecht und städtische Energiepolitik, o. J.) aus Kapazitätsgründen für neue Versorgungsgebiete Anschlussgesuche von Gebäuden mit <25 kW Leistung derzeit nicht bearbeitet werden. Daher sei ein Mindestwärmewert (Wärmeleistungswert oder -bedarfswert) sinnvoll, sodass die erste Gebietsuntersuchung auf Gebäude oberhalb eines festzulegenden Wertes abzielt. Drittens gebe es Gebiete und Straßen, in denen keine Leitungen verlegt werden dürfen. Viertens gebe es Straßen, die priorisiert mit Wärmenetzleitungen erschlossen werden sollen. Fünftens solle berücksichtigt werden, welche Gebäude in jedem Fall an das Netz anzuschließen sind. Sechstens solle von den restlichen potenziell zu versorgenden Gebäuden ein definierter Prozentsatz angeschlossen werden, um den Erschließungsgrad eines Gebietes abzubilden. Siebtens solle eine genaue Berechnung der Netzkosten möglich sein, indem die Leistungen und Durchmesser der einzelnen Rohrabschnitte bestimmt werden. Achtens sei eine Optimierung des Trassenverlaufs hinsichtlich der Wärmelinien-dichte anzustreben. Diese acht planungspraktischen Kriterien werden im Folgenden als ‚Praxiskriterien‘ bezeichnet, um sie von anderen planungspraktischen Kriterien abzugrenzen.

Zusammenfassend gesagt: Nach dem praxisnahen Planungshandbuch Fernwärme (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 105–110) wird in der Vorstudie ein längenoptimierter Trassenverlauf erstellt, um eine erste Wirtschaftlichkeitsberechnung durchzuführen. In den

folgenden Planungsphasen wird der Trassenverlauf immer weiter verfeinert (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 105–110). Als Teil dieser Verfeinerung werden die von einem Energieversorger genannten Praxiskriterien angesehen. Bei einer Berücksichtigung der Praxiskriterien für die erste Berechnung der Wärmelinienichte könnte ein präziseres Ergebnis erzielt werden.

2.4 Vorhandene digitale Werkzeuge zur Wärmenetzplanung

Es existiert bereits eine Vielzahl an Werkzeugen für die Wärmenetzplanung. Höffner (2022) hat mit einer systematischen Literaturrecherche 101 digitale Wärmenetzplanungswerkzeuge identifiziert. Die meisten Modelle aus der Literatur sind jedoch proprietär (Röder et al., 2021, S. 8). Publikationen zu diesen Modellen bieten zwar hilfreiche Informationen, da aber der Quellcode meist nicht öffentlich ist, können diese Modelle weder genutzt noch weiterentwickelt werden. Dies wäre aber für den wissenschaftlichen Fortschritt (Röder et al., 2021, S. 8) und zur Nachhaltigkeits- transformation der komplexer werdenden Energiesysteme nötig (Wiese et al., 2018). Daher werden in der vorliegenden Arbeit nur Softwares berücksichtigt, die frei erhältlich und open-source sind. Um einen Überblick über die schon vorhandenen, digitalen Werkzeuge zugeben, werden die für die Arbeit relevantesten im Folgenden kurz vorgestellt. Zuerst werden zwei eigenständige Softwares (CEA, Thermos) vorgestellt, gefolgt von Algorithmen für QGIS und zwei Python Toolboxes (oemof, DHgeN) und einem Python-Skript.

Die Python-basierte open-source Desktop-Software City Energy Analyst Software (CEA) hat das größte Spektrum an praktischen Einsatzmöglichkeiten von den Werkzeugen, die Höffner (2022, S. I) recherchiert hat. Die CEA-Software bietet viele Funktionen, um den Einsatz von erneuerbaren Energien in einem Stadtgebiet zu planen, von Lastgängen über Lebenszyklusanalysen bis zum Trassenverlauf (Fonseca et al., 2024).

Eine Software mit ähnlich breiter Anwendbarkeit wie CEA ist Thermos (**T**hermal **E**nergy **R**esource **M**odelling and **O**ptimisation **S**ystem). Diese open-source Software ist durch ein EU-gefördertes Projekt entstanden, das zum Ziel hatte, die Entwicklung CO₂-armer Wärme-/Kältenetze zu beschleunigen, indem es eine schnellere Erweiterung, Erneuerung und Verbesserung von Wärme-/Kältenetzen ermöglicht (Sonvilla et al., 2021, S. 4). Mit Thermos lassen sich detailliert neue Netze planen, inklusive der Trassenführung (Sonvilla et al., 2021, S. 28–29). Des Weiteren besitzt Thermos folgende Funktionalitäten: Netzwerkoptimierung hinsichtlich der Kosten, Kartenerstellung für das Planungsgebiet, Nutzung eigener GIS-Daten als Eingabedaten, Wärmebedarfsermittlung, Abschätzung der Nachfrage sowie die Ermittlung von finanziellen Einnahmen und Ausgaben (*THERMOS Tools*, 2021). Thermos wird als Webversion zu Verfügung

gestellt und ist kostenfrei nutzbar (*THERMOS*, 2021). Dabei richtet sich die Software an Nutzer:innen, die ein Verständnis von Wärme-/Kältenetzen haben und mit GIS-Daten umgehen können (Sonvilla et al., 2021).

Daneben gibt es Werkzeuge, die direkt in QGIS verwendet werden können. Einerseits gibt es Werkzeuge zur Erstellung möglichst kurzer Netze: beispielsweise die beiden GIS-Module *v.net.steiner* (Blazek, o. J.) und *v.net.spanningtree* (Bundala, o. J.) von GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) sowie das Plugin *Minimum Spanning Tree* (Çalışkan & Anbaroğlu, 2020). Diese Algorithmen decken jedoch nur einen Teilaspekt der Trassenerstellungsplanung ab. Darüber hinaus gibt es auch noch das QGIS-Plugin³ *planheat* (*Planheat-Tool*, 2019/2021), das Teil eines EU-geförderten Forschungsprojektes ist und zur Erstellung von CO₂-armen Wärme-/Kälteversorgungsszenarien dient. Das *planheat* Plugin besteht aus drei Funktionsbereichen: den Analysefunktionen zur Berechnung von Wärmebedarfen und Wärmequellen, den Planungsfunktionen zur Entwicklung von Szenarien und den Funktionen zur genauen Simulation (*Planheat*, o. J., S. 9).

Innerhalb der Python-Toolbox *oemof* können mit dem Paket *DHNx*, Wärme-/Kältenetzen modelliert werden. Die Hauptfunktionen sind die Optimierung der Trassenführung und der Größe sowie die thermische und hydraulische Simulation (*DHNx Release*, 2024). Dafür werden *osmnx* und *geopandas* genutzt. Die Anwendung ist nicht niedrighschwellig, da Programmierkenntnisse nötig sind und die Dokumentation (*DHNx Dokumentation*, o. J.) zum Zeitpunkt der Arbeit nur kurz ist.

Daneben gibt es das Python-Modul *DHgeN* (Peronato & Kämpf, 2022/2022), das einen optimierten Trassenverlauf für Wärmenetze erstellt. Die zugehörige wissenschaftliche Publikation (Peronato & Kämpf, 2022/2022) ist bisher nur als Preprint erschienen. Zur Anwendung muss mit der Kommandozeile gearbeitet werden, weshalb auch zur Nutzung von *DHgeN* grundlegende Programmierkenntnisse nötig sind.

Ein weiteres Werkzeug sind zwei Pythonskripte von Ivan Dochev, die für QGIS geschrieben wurden (Dochev, 2018/2021, basierend auf; Dochev, Peters, et al., 2018). Mit dem einen Skript kann ein hypothetisches Wärmenetz erstellt werden, wobei zuerst einzelnen Netze für Gebäudegruppen erstellt werden (Dochev, Peters, et al., 2018, S. 414). Mithilfe des zweiten Skripts kann das Netz erweitert werden, sodass Gebiete mit einer definierten Wärmelinienendichte erschlossen werden (Dochev, Peters, et al., 2018, S. 417).

3 *planheat* Handbuch: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5cbaa04f9&appId=PPGMS>

planheat Website <https://cordis.europa.eu/article/id/418362-integrated-tool-helps-local-government-draw-up-district-heating-networks>

Bezüglich open-source Wärmenetzplanungswerkzeugen lässt sich zusammenfassen: Es gibt zwei eigenständige Softwares und ein QGIS-Plugin mit vielen Funktionalitäten, deren Anwendung aufwendig ist, aber detaillierte Ergebnisse liefert. Des Weiteren existieren einige Pythonwerkzeuge, die entsprechende Programmierkenntnisse voraussetzen. Zudem sind in QGIS Werkzeuge zur Erstellung von Netzen minimaler Länge vorhanden, was aber nur einen kleinen Teil einer Trassenplanung abdeckt.

2.5 Forschungsbedarf und Hypothesen

In der Praxis wird für die erste Planungsphase (Vorstudie) eine erste Abschätzung des Trassenverlaufes benötigt. Als Teil des Hamburger Wärmekatasters gibt es bereits ein öffentlich zugängliches, hypothetisches Wärmenetz für bisher nicht erschlossene Gebiete Hamburgs (Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft, 2019). Solch ein Netz ist aber nicht für alle Städte vorhanden, ermöglicht weder in der Planung verschiedene Szenarien zu erstellen, noch einen Einspeisepunkt selbst auszuwählen und berücksichtigt nicht die genannten Praxiskriterien. Daher bleibt der Bedarf bestehen, eigene Trassenverläufe erstellen zu können. Um den Planungsaufwand zu reduzieren und die Ergebnisse zu optimieren, scheint dafür eine automatisierte Planung des Trassenverlaufes naheliegend.

Durch die Wärmeverluste beim Wärmetransport (Dochev, Peters, et al., 2018, S. 411) und durch die hohen, netzlängenabhängigen Investitionskosten haben Wärmenetze einen starken räumlichen Aspekt. Hinzu kommt die planerische Komplexität durch die Flächenkonkurrenz in Städten (Engelmann et al., 2021, S. 358). Dies legt eine räumliche Analyse mit GIS nahe, was sich durch die Verwendung von GIS-Ansätzen in den Publikationen aus Kapitel [2.2 Stand der Wissenschaft](#) bestätigt. Da wissenschaftliche Energiesystemmodelle open-source sein sollten (Wiese et al., 2018), soll für diese Arbeit eine open-source GIS-Software verwendet werden. Nach Muenchow et al. (2019, S. 12) und Fuchs et al. (2016, S. 479) ist die Software QGIS eine weitverbreitete open-source GIS-Software. Diese Tatsache spiegelt sich in der QGIS-Nutzung in Publikationen zur Wärmenetztrassenplanung wider, etwa in (Dénarié et al., 2021; Fuchs et al., 2016; Lumbreras et al., 2022; Salenbien et al., 2023; Schmidt & Stange, 2021). Ein Werkzeug für QGIS würde den Vorteil bieten, dass Planende die Analyse innerhalb einer gewohnten Software machen können.

Es gibt bereits Wärmeplanungswerkzeuge, die in QGIS nutzbar sind. Aus verschiedenen Gründen sind sie aber nicht für eine schnelle Bewertung geeignet: Die allgemeinen Netzerstellungswerkzeuge in QGIS (v.net.steiner, v.net.spanningtree, Plugin Minimum Spanning Tree) beinhalten beispielsweise nicht die Erstellung von Anschlusspunkten. Für die Python-Algorithmen DHNx, DHgen und die Arbeiten von Dochev et al. (Dochev, Peters, et al., 2018, basierend auf; Dochev,

2018/2021) sind Programmierkenntnisse nötig, weshalb sie nicht von Planenden ohne Programmierkenntnisse genutzt werden können. Die Softwares CEA und Thermos sowie das QGIS-Plugin planheat sind nicht schnell und einfach in der Anwendung, da sie umfangreiche Funktionalitäten besitzen. Zudem sind CEA und Thermos nicht in QGIS nutzbar.

Abgesehen davon, dass einige wissenschaftliche Modelle (bspw. Lumbreras et al., 2022; bspw. Röder et al., 2021; bspw. Salenbien et al., 2023; bspw. Wack et al., 2023) nicht frei verfügbar sind entgegen den Erkenntnissen von Wiese et al. (2018), berücksichtigen sie nicht die Praxiskriterien. Als räumliche Restriktionen bestimmen diese Praxiskriterien jedoch den Trassenverlauf und bilden damit die Grundlage für die in den Publikationen betrachteten thermischen, hydraulischen und finanziellen Aspekte.

Da die aufgezeigten Praxiskriterien, als Beispiel für planungspraktische Kriterien, weder in den digitalen Werkzeugen noch in den wissenschaftlichen Modellen wiederzufinden sind, ist das Ziel dieser Arbeit ein Werkzeug zu erstellen, das die schnelle, erste Abschätzung des Trassenverlaufes vereinfacht unter Berücksichtigung der Praxiskriterien. Anhand der Wärmelinien-dichte sollen mit dem Werkzeug städtische Gebiete in der Größe von Stadtteilen hinsichtlich ihrer Wärmenetz-eignung verglichen werden können. Dies soll Planenden bei der Einschätzung helfen, in welchen Gebieten zuerst Fernwärme ausgebaut werden soll. Der Vergleich mit anderen Heiztechnologien ist nicht Teil dieser Arbeit. Um möglichst vielen Planenden zugänglich zu sein, soll das Werkzeug ohne Programmierkenntnisse anwendbar sein, indem es als QGIS-Werkzeug über die grafische Benutzendenoberfläche von QGIS bedienbar ist. Durch die Berücksichtigung der Praxiskriterien soll die erste Abschätzung des Trassenverlaufes an die Realität angenähert werden. Die Implementierung der Praxiskriterien soll in dieser Arbeit beispielhaft demonstriert werden, damit diese in den wissenschaftlichen Modellen, beispielsweise Röder (2021), Salenbien et al. (2023), Schmidt und Stange (2021) und Wack et al. (2023), ergänzt werden. Denn auch für die detaillierte thermisch-hydraulische Planung bleiben die räumlichen Restriktionen planungspraktischer Kriterien, wie beispielsweise die Praxiskriterien, bestehen.

Aus diesen Zielen lassen sich folgende Hypothesen ableiten:

- Hypothese A: Innerhalb von QGIS lässt sich eine vereinfachte Planung des Trassenverlaufes für den Ausbau von Wärmenetzen automatisieren.
- Hypothese B: Bei der automatisierten Ermittlung des Trassenverlaufes können die Praxiskriterien von Seite 9 berücksichtigt werden.

Daneben soll geschaut werden, ob die Ergebnisse des Modells eine erste Abschätzung für einen möglichen Trassenverlauf im Untersuchungsgebiet liefern. Hierbei besteht explizit nicht der

Anspruch, eine realistische Leitungsbauplanung zu erzeugen. Laut eines Wärmeversorgers müsste dafür das Modell um Informationen erweitert werden, wie beispielsweise die Verkehrsführung während der Bauphase und welche Gebäude an das Netz angeschlossen werden wollen. Zudem sind hydraulische, thermische und regulatorische Aspekte nicht Gegenstand dieser Arbeit und Investitionskosten werden nur durch die Minimierung der Netzlänge berücksichtigt.

3 Methodik

Im folgenden Methodikteil der Arbeit wird zunächst im Kapitel [3.1 Begründung zur Erstellung eines Modells](#) dargelegt, welchen Zweck die Erstellung eines Modells im Rahmen des Forschungsinteresses einnimmt. Anschließend wird im Kapitel [3.2 Untersuchungsgebiet](#) das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit charakterisiert, weil das Modell anhand dieses Gebietes entwickelt und getestet wurde. Im Kapitel [3.3 Design des zu erstellenden Modells](#) wird zunächst der verwendete Steinerbaum-Algorithmus erläutert, der für die längenoptimierte Trassenerstellung verwendet wird. Aufbauend darauf werden die Praxiskriterien beschrieben, in die der Steinerbaum-Algorithmus im Modell eingebettet ist. Anschließend wird im Kapitel [3.4 Umsetzung des Modells](#) die Umsetzung der vorherigen theoretischen Betrachtungen in ein QGIS-Modell erläutert. Zur Evaluierung des Werkzeugs wird es auf das Untersuchungsgebiet angewendet. Die dafür verwendeten Geodaten und Parameter werden ebenfalls beschrieben.

3.1 Begründung zur Erstellung eines Modells

Das methodische Vorgehen beinhaltet die Entwicklung eines Automatisierungsprozesses als geografisches Modell in QGIS. Dieser Ansatz liegt in der Hypothese A begründet. Der Ansatz entspricht einer deduktiven Erkenntnislogik, da ausgehend von den Randbedingungen (Planungskriterien) als allgemeine Gesetze, über die Geodaten als Repräsentation der individuellen räumlichen Gegebenheiten auf die räumliche Trassenführung eines Wärmenetzes als Phänomen geschlossen wird (Sandberg, 2016, S. 37–38). Konkret erstellt der automatisierte Prozess (im Folgenden auch als ‚Modell‘ oder ‚erstelltes Modell‘ bezeichnet) innerhalb kurzer Zeit⁴ die räumliche Trassenführung eines Wärmenetzes. Die Trassenführung basiert auf georeferenzierten, vektoriellen Daten zu Gebäuden, Straßen und Flurstücken, die über eine Maske als Eingabedaten eingelesen werden.

Ziel der Arbeit ist die schnellere und einfachere erste Planung von Wärmenetzen, was ein Modell ermöglichen kann, indem nur Daten und Parameter ausgewählt werden müssen und die Berechnung nur einige Sekunden bis Minuten dauert. Im Gegensatz zu einem nicht automatisierten Verfahren kann dadurch auch für große Gebiete zügig eine erste Bewertung erzeugt werden. Des Weiteren können die Berechnungen wiederholt ausgeführt werden, um verschiedene Gebiete gleichartig zu bewerten. Allerdings ist das Modell auf bestimmte räumliche Merkmale ausgelegt, da es anhand der Siedlungsstruktur des Untersuchungsgebietes Hamburg Heimfeld entwickelt wurde (siehe Kapitel [3.2 Untersuchungsgebiet](#)).

4 Für das Untersuchungsgebiet in Hamburg-Heimfeld dauert der Prozess etwa 15 Sekunden.

Durch einen automatisierten Prozess entstehen die Fehler systematisch. Zufällige Fehler, die auf die zugrunde liegenden Geodaten zurückzuführen sind, können jedoch selbst durch einen automatisierten Prozess nicht ausgeschlossen werden. Ein automatisierter Prozess weist jedoch die Unzulänglichkeit auf, dass viele Aspekte der Planungspraxis vernachlässigt werden, um das Modell praktikabel zu halten. Teil der Betrachtung sind die räumlich geprägten Praxiskriterien.

Das Modell arbeitet mit Vektordaten, weil diese eine höhere geometrische Genauigkeit haben als Rasterdaten und damit für Infrastrukturplanungen geeignet sind (Lange, 2013, S. 356), wie beispielsweise eine Wärmenetzplanung. Zudem lagen alle benötigten Geodaten bereits in Vektorform vor. Der Nachteil von Vektordaten gegenüber Rasterdaten ist eine aufwendige Datenerfassung (Lange, 2013, S. 356). Da die Daten für diese Arbeit bereits vorliegen, ist das irrelevant.

Aufgrund der genannten Vor- und Nachteile kann festgehalten werden, dass für die Wärmenetzplanung die Erstellung eines Modells auf Basis von Vektordaten vorteilhaft ist, durch die praktische Anwendbarkeit, das systematische Verfahren und die geometrische Genauigkeit.

3.2 Untersuchungsgebiet

Nachdem dargelegt wurde, warum eine Modellerstellung sinnvoll ist, wird in diesem Kapitel das Gebiet charakterisiert, anhand dessen das Modell erstellt wurde. Das Modell ist auf die Siedlungsstruktur ausgelegt, anhand derer es entwickelt wurde und es konnten dementsprechend nur Limitationen und Fehler beobachtet werden, die im Untersuchungsgebiet auftraten. Beispielsweise treten in dem Gebiet keine Hindernisse wie Gewässer auf, weshalb darauf in der Arbeit nicht eingegangen wird.

Das Untersuchungsgebiet (AOI) liegt in Europa, im südlichen Teil der Großstadt Hamburg, im Stadtteil Heimfeld (siehe [Abbildung 3](#)), ist circa 0,24 km² groß und hat eine städtische Siedlungsstruktur. Basierend auf ALKIS (Amtliches Liegenschaftsinformationskataster) umfasst das AOI 321 Gebäude (Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (LGV) Hamburg, 2020). Das liegt in der Größenordnung, in der sich auch die Untersuchungsgebiete in der Literatur zur GIS-basierten Wärmeplanung befinden. Schmidt und Stange (2021) untersuchen ein Gebiet mit 27 Anschlusspunkten, Wack et al. (2023) untersuchen 160 Anschlusspunkte und Salenbien et al. (2023) 3.800 Gebäude. Vorteilhaft an der Größe des hier verwendeten AOIs ist, dass die Berechnungen des Modells nur einige Sekunden brauchen und gleichzeitig das Gebiet groß genug ist, um eine ausgeprägte Netzstruktur zu entwickeln.

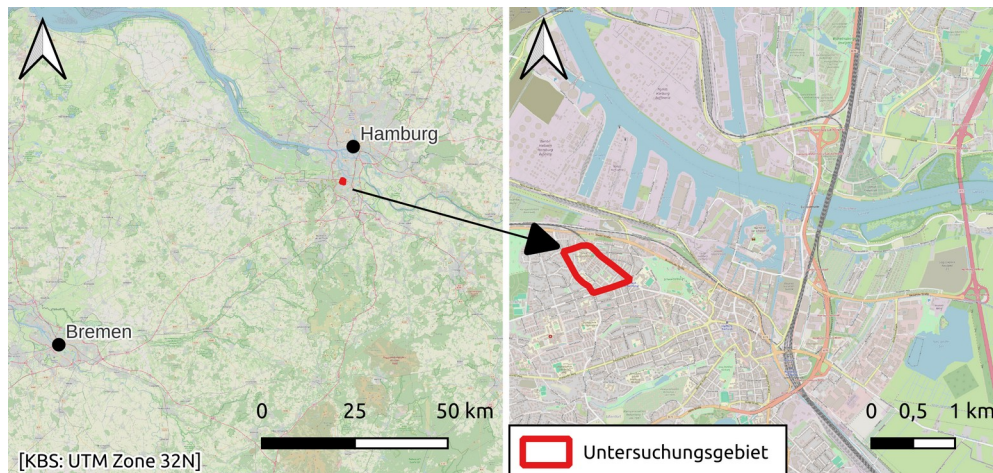


Abbildung 3: Untersuchungsgebiet in Heimfeld in Hamburg in Deutschland. Hintergrundkarten von OpenStreetMap (o. J.)

Als wärmenetzrelevante Eigenschaften des Gebietes sollen hier die Wärmebezugsdichte, als Parameter für eine erste Einschätzung der Wärmetauglichkeit (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 105), und der durchschnittliche Wärmebedarf der Gebäude, zur Charakterisierung der Gebäude, genannt sein. Die Wärmebezugsdichte liegt bei $68,2 \text{ kWh/a}\cdot\text{m}^2$ (Szenario *unsaniert*; siehe Kapitel 3.4.2 Eingabedaten für die Beschreibung der Wärmebedarfsszenarien) beziehungsweise $46,6 \text{ kWh/a}\cdot\text{m}^2$ (Szenario *saniert*). Der durchschnittliche Wärmebedarf der Gebäude liegt bei $50399,1 \text{ kWh/a}$ (Szenario *unsaniert*) beziehungsweise bei $34460,0 \text{ kWh/a}$ (Szenario *saniert*). Die Wärmebedarfe wurden ermittelt, basierend auf der Methodik von Dochev et al. (2020).

3.3 Design des zu erstellenden Modells

Nachdem dargelegt wurde, welche Vor- und Nachteile die Erstellung eines Modells hat, werden in diesem Kapitel die theoretischen Hintergründe aufgezeigt, die die Funktionalitäten des Modells begründen.

3.3.1 Steinerbaum-Algorithmus zur Netzerstellung

Für die längenoptimierte Planung von Wärmenetztrassen wird oft der Minimale Spannbaum (MST) Algorithmus aus der mathematischen Graphentheorie verwendet (bspw. Dénarié et al., 2021, S. 64; bspw. Geiß et al., 2011; bspw. Jebamalai et al., 2019, S. 491; bspw. Lumbreras et al., 2022; bspw. Schmidt & Stange, 2021, S. 100). Eine Variante davon ist der Steinerbaum-Algorithmus, der für die vorliegende Arbeit verwendet wurde. Durch die Anwendung eines MST-Algorithmus wird ein möglichst kurzes Netz mit entsprechend geringen Investitionskosten erzeugt, wodurch für Fernwärmekund:innen und/oder für Wärmenetzbetreibende die Kosten sinken.

Die Voraussetzung für beide Algorithmen ist ein ungerichteter Graph, der einerseits aus Knoten besteht und andererseits aus Kanten, welche die Knoten verbinden und eine positive Gewichtung haben (Rehfeldt, 2021, S. 1). Bei einem Steinerbaum wird eine Teilmenge der Knoten (sogenannte Terminale) bestimmt, die durch einen Graphen verbunden werden, bei dem die Summe der Kanten-Gewichtungen minimal ist (Rehfeldt, 2021, S. 1). Dabei dürfen auch Knoten in den Graphen einbezogen werden, die nicht zur Teilmenge gehören und als Steiner-Knoten bezeichnet werden (Rehfeldt, 2021, S. 1, 13). Wenn alle Knoten des Graphen verbunden werden müssen (Teilmenge der Knoten entspricht der Gesamtheit der Knoten), handelt es sich um ein MST-Problem (Rehfeldt, 2021, S. 1), was sich mit dem gleichnamigen Algorithmus lösen lässt. Der Algorithmus erzeugt ein unvermaschtes Netz (Strahlennetz) (Dénarié et al., 2021, S. 64). Um ein Ring-/Maschennetz zu erstellen, können manuell einzelne Leitungen hinzugefügt werden (Schmidt & Stange, 2021). Gleiches gilt folglich für Netze, die mit einem Steinerbaum-Algorithmus erstellt wurden.

Bei einer Netzoptimierung repräsentieren die Terminale die Anschluss- und Quellpunkte; die Steiner-Knoten sind Verzweigungen innerhalb des Netzes.

Die Kanten repräsentieren die Leitungsabschnitte des Netzes, wobei deren Gewichtung in der Regel der Länge des Abschnittes entspricht (Dénarié et al., 2021, S. 64). Indem die Summe der Kanten-Gewichtungen minimiert wird, wird das kürzeste Netz erstellt, das alle Terminale miteinander verbindet. Die Gewichtung der Kanten muss nicht rein von der Länge abhängen: Dochev, Peters, et al. (2018, S. 414) haben beispielsweise bei Kanten zwischen zwei Anschlusspunkten (also Haus-zu-Haus-Leitungen) die Länge mit dem Faktor 2 multipliziert (siehe [Abbildung 4](#)). Folglich geht die Wärmeleitung von Haus A nur zum benachbarten Haus B, wenn die Straße mehr als doppelt so weit entfernt ist wie Haus B. Dadurch soll verhindert werden, dass die Gebäude nicht ausschließlich über eine Haus-zu-Haus-Trassenführung angeschlossen werden.

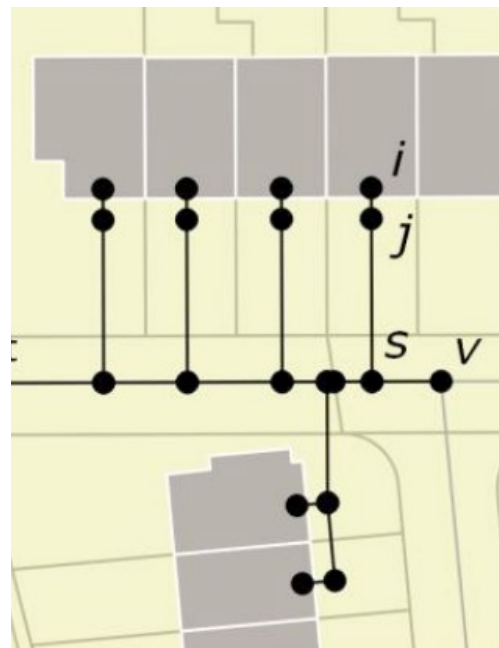


Abbildung 4: Gewichtung der Katen und Erstellung der Hausanschlussleitungen in Dochev, Peters, et al. (2018, S. 415).

Es gibt verschiedene GIS-Werkzeuge, die einen MST- oder Steinerbaum-Algorithmus zur Netzerstellung verwenden. Dénarié et al. (2021, S. 64) haben beispielsweise das QGIS-Plugin Minimum Spanning Tree von Çalışkan und Anbaroğlu (2020) zur Wärmenetzerstellung genutzt. In der hier vorliegenden Arbeit wurden darüber hinaus folgende Werkzeuge zur Netzerstellung in

Betracht gezogen: die GRASS-GIS Module `v.net.steiner` (Blazek, o. J.) und `v.net.spanningtree` (Bundala, o. J.), das QGIS-Plugin `planheat` (*Planheat-Tool*, 2019/2021), ein Python-Skript von Dochev (2018/2021) sowie die Python-Pakete `DHgeN` (Peronato & Kämpf, 2022/2022), `DHNx` (*oemof/DHNx*, 2019/2024) und `DistrictHeatSim` (Pfeiffer, 2023/2024). Letztendlich wurde das GRASS-GIS Modul `v.net.steiner` (Blazek, o. J.) verwendet, weil sich dessen Verwendung als am unkompliziertesten erwies und ein zeiteffizientes Arbeiten ermöglichte. Vor allem die grafische Oberfläche und die einfache Anwendung in der verwendeten Programmierumgebung waren vorteilhaft.

Das Modell braucht als Eingabedaten ein Netz, welches hier als Grundlagennetz bezeichnet wird und alle Anschluss- und Quellpunkte verbindet. Das Grundlagennetz besteht aus Straßen und Hausanschlussleitungen. Auf Basis dieses Grundlagennetzwerkes errechnet das `v.net.steiner`-Werkzeug dann ein längenoptimiertes Netz. Die zentrale Annahme der automatisierten Wärmenetzplanung ist, dass die Hauptleitungen des Wärmenetzes unter Straßen verlegt werden. Dies entspricht der baulichen Praxis (Fischedick et al., 2007, S. 75; Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 83) und wird standardmäßig in wissenschaftlichen Arbeiten angenommen, siehe beispielsweise (Dochev, Peters, et al., 2018, S. 414; Lumbreras et al., 2022, S. 2; Salenbien et al., 2023, S. 2).

Die Hausanschlussleitungen sind im hier erstellten Modell die kürzesten Wege zwischen dem Anschlusspunkt und der nächstgelegenen Straße. Diese Standardtrassenführung wird auch häufig in der wissenschaftlichen Literatur angenommen (Dochev, Peters, et al., 2018, S. 415; Erdmann et al., 2021, S. 235; Lumbreras et al., 2022, S. 5; Röder et al., 2021, S. 10) und wird in der Praxis oft verwendet (Doetsch et al., 1998, S. 38). Von Dochev, Peters, et al. (2018, S. 414) wird eine andere Methode verwendet (siehe [Abbildung 4](#)): Dort wird der Anschlusspunkt i mit einem weiteren Punkt j verbunden, der auf einer 2 m Buffer-Linie rings um das Gebäude liegt (Dochev, Peters, et al., 2018, S. 414). Je nach räumlicher Konstellation werden dann die Punkte j nicht direkt mit der nächsten Straße verbunden, sondern es werden mehrere Punkte j verknüpft, bevor sie mit der nächsten Straße verbunden werden (siehe in diesem Kapitel Absatz zu Gewichtung der Kanten). Durch die Flexibilität, wie die Gebäude mit den nächsten Straßen verbunden werden, kann eine kürzere Netzlänge erreicht werden. Um die Modellkomplexität gering zu halten, wurde diese Methode im erstellten Modell nicht angewendet. Das erhöht tendenziell die Netzlänge des hier vorgestellten Modells, abhängig von der räumlichen Struktur.

Folgende Vereinfachung kann zu Abweichungen zwischen der ermittelten und der praktisch notwendigen Netzlänge führen: Für die Berechnung der Trassenlänge wird hier angenommen, dass die Rohre genau entlang der Linien des Straßenlayers in der Mitte der Straßen verlaufen. In der

baulichen Praxis muss jedoch berücksichtigt werden, dass unter Straßen häufig schon Werkleitungen verlegt wurden, sodass der genaue Verlauf der Fernwärmeleitungen davon abhängig ist, wo noch ausreichend Platz für die Verlegung ist (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 87). Daher kann die Netzlänge in Wirklichkeit leicht von den hier theoretisch ermittelten Werten abweichen. Im Modell wird außerdem angenommen, dass die Fernwärmeleitungen auf einer horizontalen, ebenen Fläche verlaufen würden, ohne jegliche Steigung. Das scheint auch in den wissenschaftlichen Publikationen angenommen zu werden, da in dort keine Details zu verwendeten Längenberechnungsfunktionen genannt werden (siehe: Dénarié et al., 2021; Dochev, Peters, et al., 2018; Röder et al., 2021; Wack et al., 2023). Diese Annahme führt tendenziell zu einer Unterschätzung der Netzlänge, was jedoch für flache Gebiete wie das Untersuchungsgebiet⁵ zu vernachlässigen ist.

3.3.2 Randbedingungen und getroffene Annahmen

Nachdem im vorherigen Abschnitt die Netzerstellung erläutert wurde, wird hier näher auf Randbedingungen eingegangen, in welche die Netzerstellung eingebettet wurde. Dafür werden Praxiskriterien, die im Modell umgesetzt wurden, im Folgenden erläutert.

Gebäudeauswahl

Auf der Website zum Wärmekataster Hamburg steht: „Auf Grund sehr vieler Anfragen können aktuell Anschlussgesuche von kleinen Gebäuden (< 25 kW Leistung) nur in Ausnahmefällen und nur wenn diese innerhalb des Wärmenetzgebietes liegen, bearbeitet werden!“ (BUKEA Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft. Amt für Energie und Klima. Abteilung Energierecht und städtische Energiepolitik, o. J.) In Anlehnung an diese Aussage wird die Notwendigkeit erkannt, eine Filterfunktion in das Modell zu implementieren. Damit werden die Gebäude des Wärmekatasters anhand ihrer Werte in der Attributtabelle gefiltert, beispielsweise anhand der thermischen Leistung. Ein Gebäude entspricht dabei einem Objekt in der Attributtabelle, wodurch bei Reihenhäusern, die als einzelne Gebäude kartiert wurde, der Mindestwärmewert auf jedes einzelne Haus der Häuserreihe angewendet wird und nicht auf den Häuserblock. In dieser Arbeit wurde beispielhaft der Wert aus dem Wärmekataster von 25 kW verwendet, sodass für die schnelle, erste Abschätzung nur Gebäude oberhalb dieses Wertes einbezogen werden. Der konkrete Wärmewert kann jedoch von den Planenden eingestellt werden.

Der Großteil (mehr als 80 %) der Wärme- und Kälteversorgung in Deutschland sind nicht erneuerbar (Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) am

⁵ 21,13 m Höhendifferenz auf 0,24 km² Fläche (eigene Messungen basierend auf Freie und Hansestadt Hamburg, Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (LGV), 2020a)

Umweltbundesamt, 2024, S. 11). Heizungen von Gebäuden mit hoher Leistung emittieren entsprechend mehr Treibhausgase. Daher wird in dieser Arbeit angenommen, dass die Einsparungen der Treibhausgasemissionen pro Fernwärmeanschlusspunkt maximiert wird, wenn zuerst diese Gebäude mit hohen Emissionen an ein klimaneutrales Wärmenetz angeschlossen werden. Die Festlegung eines Grenzwertes kann daher zu einer schnelleren Dekarbonisierung der Wärmeversorgung beitragen.

Anstatt Gebäude nach deren Leistung zu filtern, könnte das Modell theoretisch auch nach anderen Attributen filtern. Das Attribut, nach dem gefiltert wird, kann manuell festgelegt werden. Daher wäre es auch möglich, lediglich danach zu filtern, welche Gebäude einen Wärmebedarf größer Null aufweisen. So wird erreicht, dass beispielsweise unbeheizte Garagen vom Modell nicht angeschlossen werden. Durch den Wert von >25 kW wird diese Bedingung automatisch erfüllt.

Anschlusspunkte je Flurstück

Nachdem geklärt wurde, welche Gebäude in die Betrachtung einbezogen werden, müssen noch die Anschlusspunkte bestimmt werden. Der Anschlusspunkt markiert den Ort der Wärmeübergabestation. An der Wärmeübergabestation endet die Zuständigkeit der Wärmenetzbetreibenden (Nussbaumer, Thalmann, & Jenni, 2021, Bild 5.1) weshalb in dieser Arbeit nur bis dorthin geplant wird.

Sofern die Lage der Anschlusspunkte in der Literatur genannt wird, werden häufig die Mittelpunkte der einzelnen Gebäude verwendet (bspw., Dochev, 2017, S. 54; bspw., Lumbreras et al., 2022, S. 3; bspw., Röder et al., 2021, S. 10). Dies ist auch in der Planungssoftware City Energy Analyst der Fall. Es gibt jedoch auch andere Ansätze: Erdmann et al. (2021, S. 232) nehmen die Punkte, welche die amtlichen Adressen des Gebäudes festlegen. Dochev, Peters, et al. (2018, S. 414) verwenden beide Ansätze, indem standardmäßig die Koordinaten der Adresse verwendet werden, die i. d. R. den Hauseingang markieren. Für Gebäude, bei denen die Adresspunkte nicht vorhanden sind, wird der Mittelpunkt des Gebäudes verwendet. In der Planungssoftware Thermos wird als Anschlusspunkt ein Punkt an der Gebäudehülle verwendet.

Für die vorliegende Arbeit wurde keiner der genannten Ansätze verwendet, sondern es wurde ein neues Verfahren entwickelt. Laut Erfahrungswerten eines Wärmeversorgers kommt es häufig vor, dass sich mehrere Gebäude auf dem gleichen Flurstück oder Baublock über einen gemeinsamen Anschlusspunkt an ein Fernwärmenetz anschließen lassen. Um zu wissen, welche Gebäude zusammen versorgt werden können, wären Informationen darüber notwendig, welche Gebäude zusammen eine Heizanlage besitzen. Für Hamburg sind diese Informationen nicht öffentlich verfügbar. Da für Hamburg auch keine Daten zu Anschlusspunkten an ein bestehendes Wärmenetz

öffentlich verfügbar sind, konnten die Aussagen des Wärmeversorgers nicht untersucht werden. Jedoch wurde, um die Komplexität des Modells gering zu halten, als Annäherung an die Praxis angenommen: Gebäude auf dem gleichen Flurstück werden über eine Heizanlage versorgt und haben damit einen gemeinsamen Anschlusspunkt. Die genauen Orte der Anschlusspunkte (innerhalb des Flurstückes) sind noch nicht bekannt während der Vorstudie, sondern erst während der späteren Planungsphasen (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 112–113). Daher wird der Ort der Anschlusspunkte in dieser Arbeit berechnet als Flächenschwerpunkt der extrahierten Gebäude des Flurstückes, um den Anschlusspunkt an die Lage der Gebäude auf dem Flurstück anzupassen. Sofern ein Flurstück nur ein extrahiertes Gebäude enthält, ist der Anschlusspunkt der Mittelpunkt dieses Gebäudes.

Durch die Anzahl und Lage der Anschlusspunkte wird die Netzlänge und damit die Wärmelinienlänge beeinflusst (siehe dazu Seite 38).

Da im Modell maximal ein Anschlusspunkt je Flurstück erstellt wird, entsteht eine Diskrepanz in Verbindung mit dem Wärmewert des Wärmekatasters des vorherigen Kapitels, der sich auf die einzelnen Gebäude bezieht. Es wird ein Anschlusspunkt erstellt, sofern ein Gebäude des Flurstückes den Wärmewert überschreitet. Mit der getroffenen Annahme, alle Gebäude eines Flurstückes würden über einen gemeinsamen Anschlusspunkt angeschlossen, wären theoretisch auch Gebäude angeschlossen, die den Grenzwert nicht erreichen. Das widerspricht jedoch dem Wärmeleistungswert, wie er auf der Website des Wärmekatasters angegeben wurde, weshalb nur die Gebäude für die Trassenerstellung und die Berechnung der Wärmelinienlänge berücksichtigt werden, die den Grenzwert erreichen.

Erschließungsgrad

Die Netzlänge wird außerdem dadurch beeinflusst, welche der potenziell möglichen Anschlusspunkte tatsächlich angebunden werden. Dafür enthält das Modell die Funktion, dass nur ein einstellbarer Prozentsatz aller Anschlusspunkte des Untersuchungsgebietes für die Netzplanung verwendet wird. Dadurch wird berücksichtigt, dass die Praxisliteratur davon ausgeht, dass in einem potenziellen Versorgungsgebiet nur 50-80 % aller Anschlusspunkte an das Fernwärmenetz angeschlossen werden (sogenannter ‚Erschließungsgrad‘) (Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke, 2022, S. 127; Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 107). Zudem ist ein Erschließungsgrad in den genannten Praxiskriterien des Wärmeversorgers enthalten. Im Modell kann der Erschließungsgrad deaktiviert werden, indem der entsprechende Parameter im Modell auf 100 % gesetzt wird. Dénaire et al. (2021, S. 64–65) berücksichtigen den Erschließungsgrad ebenfalls, jedoch in einem anderen Kontext: In Italien verfügen nicht alle Gebäude über eine

Zentralheizung und wären daher nicht für ein Fernwärmenetzanschluss geeignet. Sollte das hier vorgestellte Modell in solchen Regionen verwendet werden, kann der Erschließungsgrad zur Annäherung an solche Aspekte verwendet werden.

Die Anschlusspunkte werden zufällig ausgewählt, weil im ersten Planungsschritt, für den dieses Modell gedacht ist, die anzuschließenden Gebäude noch nicht feststehen (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 111, 116). Ferner kann durch die mehrmalige zufällige Auswahl der Anschlusspunkte die Robustheit der Ergebnisse analysiert werden, indem das Modell mehrmals mit einem konstanten Erschließungsgrad von $< 100\%$ ausgeführt wird. Es können die Schwankungen der Netzlänge und der Wärmelinienichte beobachtet werden. Darüber hinaus ist ersichtlich, welche Leitungsabschnitte wichtig sind, da sie in einem Großteil der Netze verwendet werden und welche Leitungsabschnitt stark von den konkreten Anschlusspunkten abhängen. Die Informationen über die Wichtigkeit einzelner Leitungsabschnitte könnte eine Entscheidungshilfe für Planende sein, welche Leitungen priorisiert gebaut werden sollen.

Kostenbetrachtung

Für das Modell wurde vorerst auf eine Berechnung der netzbezogenen Investitionskosten verzichtet, da der Fokus der Arbeit auf den räumlich geprägten Praxiskriterien liegt. Eine verlässliche, das heißt nicht rein längenabhängige, Investitionskostenberechnung hätte beispielsweise die Rohrdurchmesser und die Oberflächenbeschaffenheit (befestigt, unbefestigt) berücksichtigen müssen (Aaron Wieland, 2023, S. 46; Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 202), was das erstellte Modell bisher nicht leistet.

3.4 Umsetzung des Modells

Wie die beschriebenen Kriterien konkret umgesetzt wurden, wird in den folgenden drei Kapiteln beschrieben. Nach einer Begründung zur Wahl der Programmierumgebung und der Beschreibung der zu Grunde liegenden Geodaten und Parametern folgt eine überblicksartige Beschreibung der einzelnen Berechnungsschritten innerhalb des Modells.

3.4.1 Verwendete Programmierumgebung

Für die Programmierung wurde die grafische Programmierumgebung von QGIS (Version 3.33.6-Prizren) verwendet. Diese bietet für die angestrebte Nutzung des Modells in QGIS (gemäß Hypothese A) folgende Vorteile: Es konnte sichergestellt werden, dass das Modell fehlerfrei in QGIS anwendbar ist und Kompatibilitätsprobleme (beispielsweise durch verschiedene Python-Versionen) vermieden werden. Insbesondere ermöglicht eine automatisch generierte Eingabemaske beim Start des Codes eine einfache Handhabung des erstellten Modells. Zudem bietet die grafische

Programmierumgebung neben einer Vielzahl an bestehenden GIS-Werkzeugen (QGIS native Werkzeuge, GRASS-GIS Module sowie einige Plugins) die Möglichkeit, selbst erstellte Werkzeuge für ein Modell zu nutzen. Vor allem konnte durch die intuitive grafische Programmierung das Modell zeiteffizient entwickelt werden, im Gegensatz zur Entwicklung direkt als Python-Skript. Dennoch besteht die Möglichkeit, das Modell als Python-Skript exportieren zu lassen, sodass für Forschende und Planende die Erweiterbarkeit und Anpassung des Modells erleichtert wird.

3.4.2 Eingabedaten

Für das Modell wurden Geodaten von Straßen, Flurstücken und vom Hamburger Wärmekataster verwendet. Die Datenquellen können im Modell selbst ausgewählt werden. Im Folgenden werden die für diese Arbeit verwendeten Daten kurz beschrieben.

Die verwendeten Straßendaten stammen von OpenStreetMap (OSM) (*OpenStreetMap*, o. J.) und wurden zur Identifizierung möglicher Leitungstrassen verwendet. Die Besonderheit von OSM-Daten ist die kollaborative Erstellung der Daten durch Freiwillige (Haklay & Weber, 2008). Daher ist die Datenqualität zwischen Großstädten und ländlichen Räumen unterschiedlich (Lange, 2013, S. 230). Im großstädtisch geprägten Untersuchungsgebiet waren die Straßendaten ohne offensichtliche Lücken, im Gegensatz zu den Geodaten der Hamburger Straßeninformationsdatenbank (Freie und Hansestadt Hamburg Behörde für Verkehr und Mobilitätswende, (BVM), 2022), die von Dochev, Peters, et al. (2018) verwendet wurden und bei denen Straßenabschnitte offensichtlich fehlten. Für die Qualität der OSM-Daten spricht, dass sie ebenfalls in anderen Publikationen für die Wärmenetzplanung verwendet oder vorgeschlagen wurden (siehe: Dénarié et al., 2021, S. 63–64; Erdmann et al., 2021, S. 235–237; Fuchs & Müller, 2018; Nageler et al., 2019, S. 4). Daher wird von einer ausreichenden Datenqualität ausgegangen, obwohl die Aktualität der OSM-Daten unklar ist. Für die Verwendung von OSM-Daten spricht zudem die bessere Vergleichbarkeit mit der Software Thermos, die ebenfalls OSM-Daten verwendet (Kuriyan & Shah, 2019, S. 113), wie auch die Software CEA. Dem Ansatz von Thermos und CEA folgend wurden von OSM alle Daten mit dem Key „highway“ heruntergeladen. Dadurch sind vorhandene Bürgersteige in das Grundlagennetz inbegriffen und werden vom Algorithmus v.net.steiner in die Trassenführung einbezogen. In der Praxis kann der genaue Ort der Trassen nicht ohne Weiteres bestimmt werden. Der genaue Ort der Trasse unter der Straße hängt davon ab, wo noch ausreichend Platz unter der Straße ist (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 87). Für eine erste, schnelle Einschätzung des Trassenverlaufs ist das zu vernachlässigen und die Qualität der OSM-Straßendaten ist insgesamt als ausreichend einzustufen.

Das verwendete Wärmekataster wurde anhand der Methodik von Dochev et al. (2020) und den Beschreibungen in (Behörde für Umwelt und Energie Hamburg, 2019) nachprogrammiert. Die Methodik basiert auf der Gebäudetopologie des Instituts für Wohnen und Umwelt Darmstadt (Tobias et al., 2015) sowie der VDI-Richtlinie 3807-2 (Verein Deutscher Ingenieure, 2014). Das Wärmekataster enthält die Grundfläche der einzelnen Gebäude aus dem ALKIS (ALKIS Version vom Oktober 2023). Im Untersuchungsgebiet gab es kein offensichtliches Fehlen von Gebäudepolygonen, was für eine ausreichende Vollständigkeit der Daten spricht. Für jedes Gebäude sind unter anderem Informationen zum Wärmebedarf des Gebäudes hinterlegt. Hierbei sind jeweils zwei Werte angegeben: ein Wert für das Szenario eines sanierten Gebäudezustandes und ein Wert für einen unsanierten Gebäudezustand. Diese Szenarien wurden konstruiert, weil keine Informationen zum tatsächlichen Gebäudezustand vorliegen (Behörde für Umwelt und Energie Hamburg, 2019, S. 11–12). Das Szenario *unsaniert* beschreibt den derzeitigen Wärmebedarf; für Wohngebäude berechnet mit dem durchschnittlichen Sanierungszustand und für Nichtwohngebäude berechnet als der Modalwert der Wärmebedarfe (Dochev et al., 2020, S. 236–237). Das Szenario *saniert* beschreibt einen zukünftigen, verringerten Wärmebedarf; für Wohngebäude wurde eine Sanierung nach der Energieeinsparverordnung EnEV 2014 angenommen und für Nichtwohngebäude wurde der Durchschnitt von den 25 % der Gebäude mit dem geringsten Wärmebedarf verwendet (Dochev et al., 2020, S. 236–237).

Die Wärmekataster-Daten werden in der vorliegenden Arbeit verwendet, um (1) die Wärmelinienichte zu berechnen, um (2) die Orte der Hausanschlusspunkte zu ermitteln und um (3) Gebäude anhand der thermischen Leistung zu filtern. Für das Filtern wurde die thermische Leistung der Gebäude in Kilowatt abgeschätzt, indem der Wärmebedarfe mit einer Vollbetriebsstundenzahl von 2.000 h/a dividiert wurde, basierend auf den Aussagen eines Wärmeversorgers. Die Leistung wurde mit den Wärmebedarfen des Szenarios *unsaniert* berechnet, weil der Hinweistext zum Wärmekataster (siehe Seite 20) nicht angibt, dass es sich bei den 25 kW nicht um einen aktuellen Wert (Szenario *unsaniert*) handelt. Zudem ist die jetzige durchschnittliche Leistung der aktuellste Wert, der tatsächlich sicher bestimmt werden kann, auf Basis von Verbrauchswerten.

Für die Flurstücke wurde der vom Hamburger Landesbetrieb für Geoinformation und Vermessung über das Metadatenportal MetaVer (metaver.de) bereitgestellte Datensatz „INSPIRE HH Flurstücke/Grundstücke ALKIS“ (Freie und Hansestadt Hamburg, Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (LGV), 2020b) verwendet. Zuletzt wurde der Datensatz Anfang 2020 geändert und er wird halbjährlich auf seine Aktualität geprüft (Freie und Hansestadt Hamburg, Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (LGV), 2020b). Die räumliche Genauigkeit des Datensatzes ist nicht angegeben. Diese ist allerdings für das Modell nur von geringer Bedeutung, da die Flurstücke

nur zum Gruppieren der Gebäude verwendet werden, um daraus die Anschlusspunkte zu bestimmen. Eine Beeinflussung des Trassenverlaufes würde erst bei großen Ungenauigkeiten auftreten, bei denen Gebäude anderen Flurstücken zugeordnet würden.

Zusammenfassend: Die Qualität der Geodaten von Straßen, Flurstücken und vom Wärmekataster ist ausreichend für eine schnelle, erste Abschätzung des Trassenverlaufes.

Außer den beschriebenen Geodaten erwartet das Modell noch weitere Daten und Parameter, deren Verwendung im folgenden Kapitel erläutert wird. In [Tabelle 1](#) sind alle auswählbaren Eingabedaten und Eingabeparameter des Modells, aufgelistet, mit den hier in der Arbeit verwendeten konkreten Daten beziehungsweise Parametern.

Tabelle 1: Übersicht aller Geodaten und Parameter, die das Modell erwartet (linke Spalte); für diese Arbeit verwendete Werte beziehungsweise Geodaten (rechte Spalte).

Daten die das Modell als Eingabe erwartet	in dieser Arbeit verwendete Werte bzw. Geodaten
Parameter	
Erschließungsgrad (Prozentzahl)	100 %
Umkreis um das Untersuchungsgebiet, in dem die Straßen berücksichtigt werden (numerischer Wert in Metern)	100 m
Wärmegrenzwert (numerischer Wert)	Szenario 1: 0 kW Leistung Szenario 2: 25 kW Leistung
Spaltenname des Wärmekataster-Layers, in dem die Wärmeleistungsgrenzwerte enthalten sind (Text)	Leistung_San0_in_kW
Koordinatenbezugssystem	EPSG 25832
Speicherpfad (inkl. Dateiname und „gpkg“-Dateiendung) für die Ergebnisse	---
Geodaten	
Straßen (Linien-Layer)	OSM-Straßen (key = highway) (<i>OpenStreetMap</i> , o. J.)
Flurstücke (Polygon-Layer)	INSPIRE Flurstücke für Hamburg (Freie und Hansestadt Hamburg, Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (LGV), 2020b)
Wärmekataster oder Gebäudegrundflächen (Polygon-Layer)	Wärmekataster basierend auf Methodik von (Dochev et al., 2020)
Untersuchungsgebiet (Polygon-Layer)	0,24 km ² großes Gebiet (siehe Abbildung 3)
Wärmequelle (Punkt-Layer)	siehe Ort der Wärmequelle in Abbildung 7

Für das Szenario 1 wurden für den Erschließungsgrad 100% angenommen und kein Mindestwärmewert einbezogen, um alle relevanten Gebäude des AOI mit einzubeziehen. Dies dient einerseits der Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen anderer Werkzeuge, die ebenfalls alle Gebäude des AOI anschließen, und andererseits soll so überprüft werden, ob einzelne Gebäude unerwartet unrealistisch ans Netz angebunden werden (siehe beispielsweise Seite 35).

3.4.3 Beschreibung des Modells

Zunächst führt das Modell eine Datenvorbereitung durch, bei der alle verwendeten Geodaten in das gleiche Koordinatenbezugssystem gebracht werden, das von den Nutzer:innen ausgewählt werden kann (siehe [Abbildung 5](#)). Dies soll Inkonsistenzen bei der späteren Verarbeitung verhindern. Zudem werden das Wärmekataster und die Flurstücke auf die Größe des Untersuchungsgebietes beschnitten. Das Modell erwartet das Untersuchungsgebiet als Polygon-Layer mit einem einzelnen Polygonobjekt. Ab diesem Punkt werden nur noch Gebäude und Flurstücke innerhalb des Gebietes betrachtet.

Eine zweite Modelleinheit (siehe [Abbildung 6](#)) ist die Erstellung der Anschlusspunkte. Dafür werden die Gebäude anhand ihrer thermischen Leistung extrahiert. Den entsprechenden Mindestwärmewert erwartet das Modell als Eingabe eines ganzzahligen Wertes (in [Abbildung 5](#) ist beispielhaft der Wert 0,1 eingetragen). Zusätzlich wird die Spalte des Wärmekataster-Layers angegeben, in dem sich die Attributwerte für den Grenzwert befinden.

Im nächsten Schritt werden die extrahierten Gebäude, die auf dem gleichen Flurstück stehen, zu einem Objekt aggregiert, wobei die räumlichen Geometrien unverändert bleiben. Gebäude, die auf

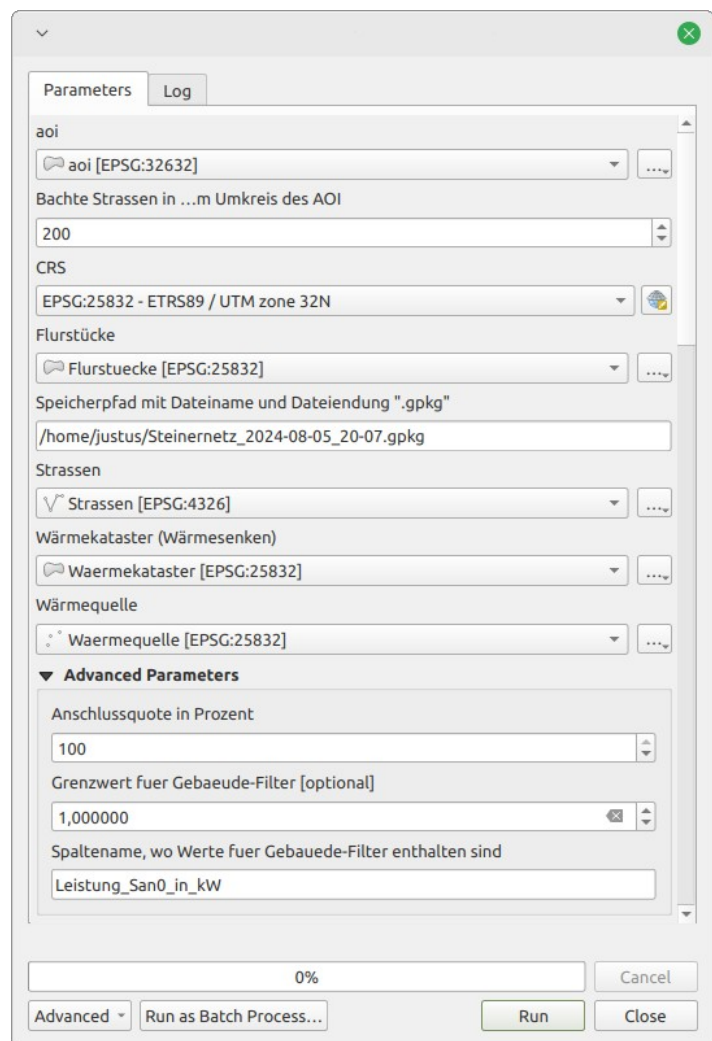


Abbildung 5: Eingabemaske des erstellten Modells mit allen Eingabedaten und Eingabeparametern

mehreren Grundstücken liegen werden dem Flurstück zugeordnet, auf welchem ihr größter Flächenanteil liegt. Für jedes der neu erstellten Objekte wird der Flächenschwerpunkt ermittelt, der als Anschlusspunkt den Ort der Wärmeübergabestation darstellt.

Von diesen Anschlusspunkten werden eine, dem Erschließungsgrad entsprechende, Anzahl an Punkten ausgewählt, die an das Netz angeschlossen werden. Der Erschließungsgrad wird als Prozentzahl vom Modell erwartet (in [Abbildung 5](#) ist beispielhaft der Wert 100 eingetragen).

Eine dritte Modelleinheit ist die Vorbereitung des Grundnetzwerkes, das für die Erstellung eines optimal kurzen Netzes benötigt wird. Dafür werden die Hausanschlussleitungen erstellt, indem von jedem Anschlusspunkt eine direkte Verbindungslinie zur nächstgelegenen Straße erstellt wird. In gleicher Weise wird mit den Wärmequellen verfahren, die das Modell als Punkt-Layer erwartet. Zuvor wurde der Straßen-Layer räumlich beschnitten. Für das Beschneiden wird das Polygon des Untersuchungsgebietes verwendet, das um eine einstellbare Distanz vergrößert wurde. Die Vergrößerung wird als ganzzahliger Modellparameter eingegeben. Der Wert sollte nicht zu klein gewählt werden, sodass Gebäude am Rand des Untersuchungsgebietes nicht mit einer Straße verbunden werden, die nicht mit dem Rest des Grundnetzwerkes verbunden ist. Das Ziel dieses Schrittes ist, die Datenmenge zu reduzieren und trotzdem Straßen zu berücksichtigen, die zwar außerhalb des Untersuchungsgebietes liegen, aber trotzdem relevant für einen optimalen Trassenverlauf sein können. Wenn die vom Anschlusspunkt aus gesehen nächstgelegene Straße außerhalb des Untersuchungsgebietes liegt und nicht berücksichtigt würde, ergäbe sich gegebenenfalls ein nicht optimaler Trassenverlauf.

Nachfolgend werden Verarbeitungsschritte durchgeführt, damit das Netzerstellungswerkzeug v.net.steiner erkennen kann, wo sich Linien des Grundnetzwerkes berühren oder kreuzen. Dafür müssen die beschriebenen Anschlussleitungen an der Seite, wo sie auf die Straße treffen, um 1 m verlängert werden. Diese Überstände von einem Meter beeinflussen die finale Trassenführung im Untersuchungsgebiet Heimfeld nicht, da sie keine weiteren Linien verbinden und somit kein Teil eines finalen, möglichst kurzen Netzes sein können. Selbst wenn räumliche Konstellationen auftreten sollten, wo der Überstand weitere Linien verbindet, ist der zu erwartende Einfluss auf die finale Trassenführung gering. Abschließend werden alle Bestandteile des Grundnetzwerkes in einer Datei zusammengeführt, deren Objekte verschmolzen werden.

Daraufhin erfolgt die eigentliche Erstellung der finalen Trassenführung mit dem GRASS-GIS-Werkzeug v.net.steiner, das von dem Grundnetzwerk jene Objekte auswählt, die zusammen das kürzest mögliche Netz bilden.

Die letzte Modelleinheit ist die Nachverarbeitung. Vom erstellten finalen Netz werden die Längen der einzelnen Netzabschnitte berechnet und diese zu einer Gesamtlänge aufsummiert und das Ergebnis wird lokal abgespeichert.

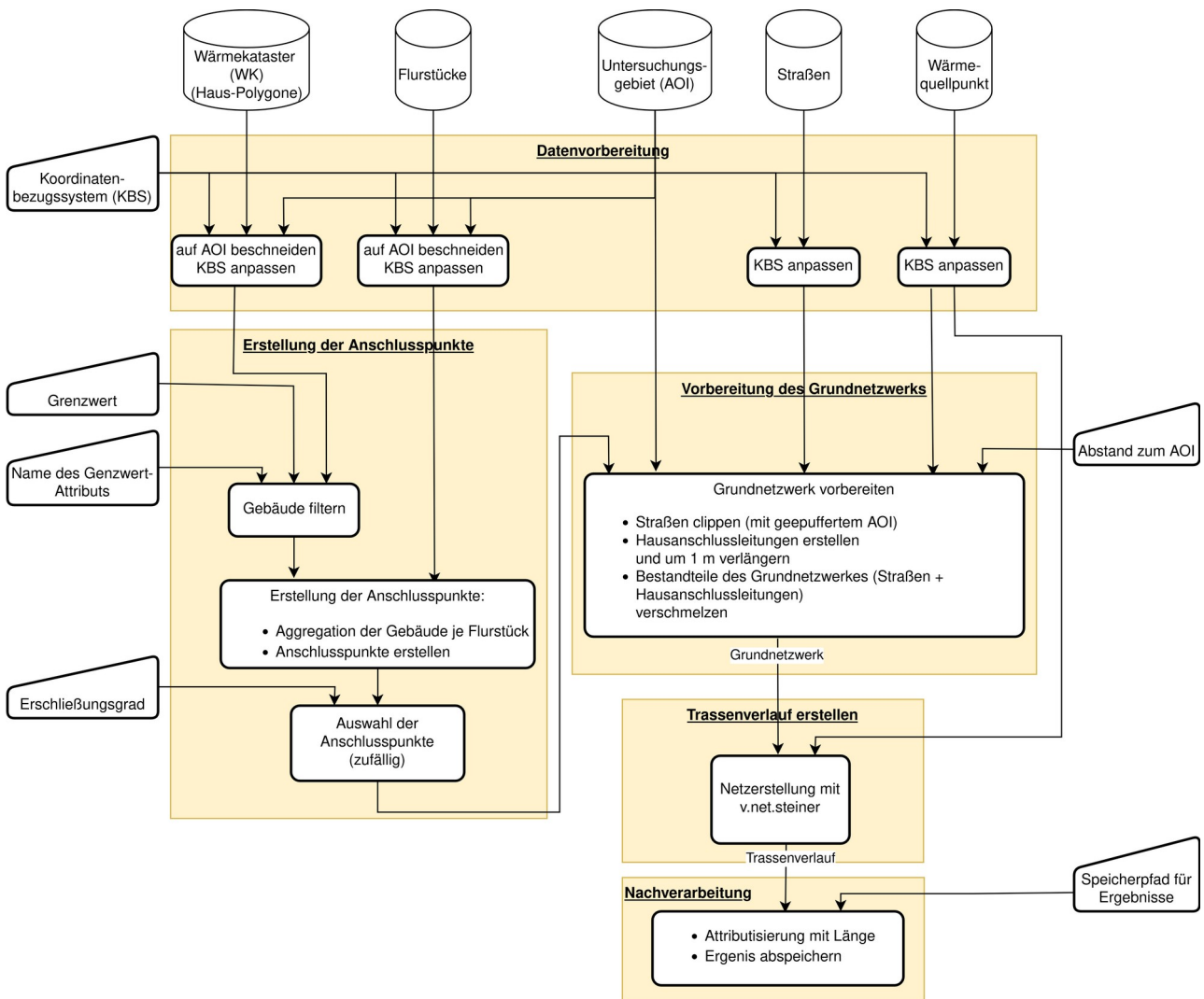


Abbildung 6: Ablauf des erstellten Modells

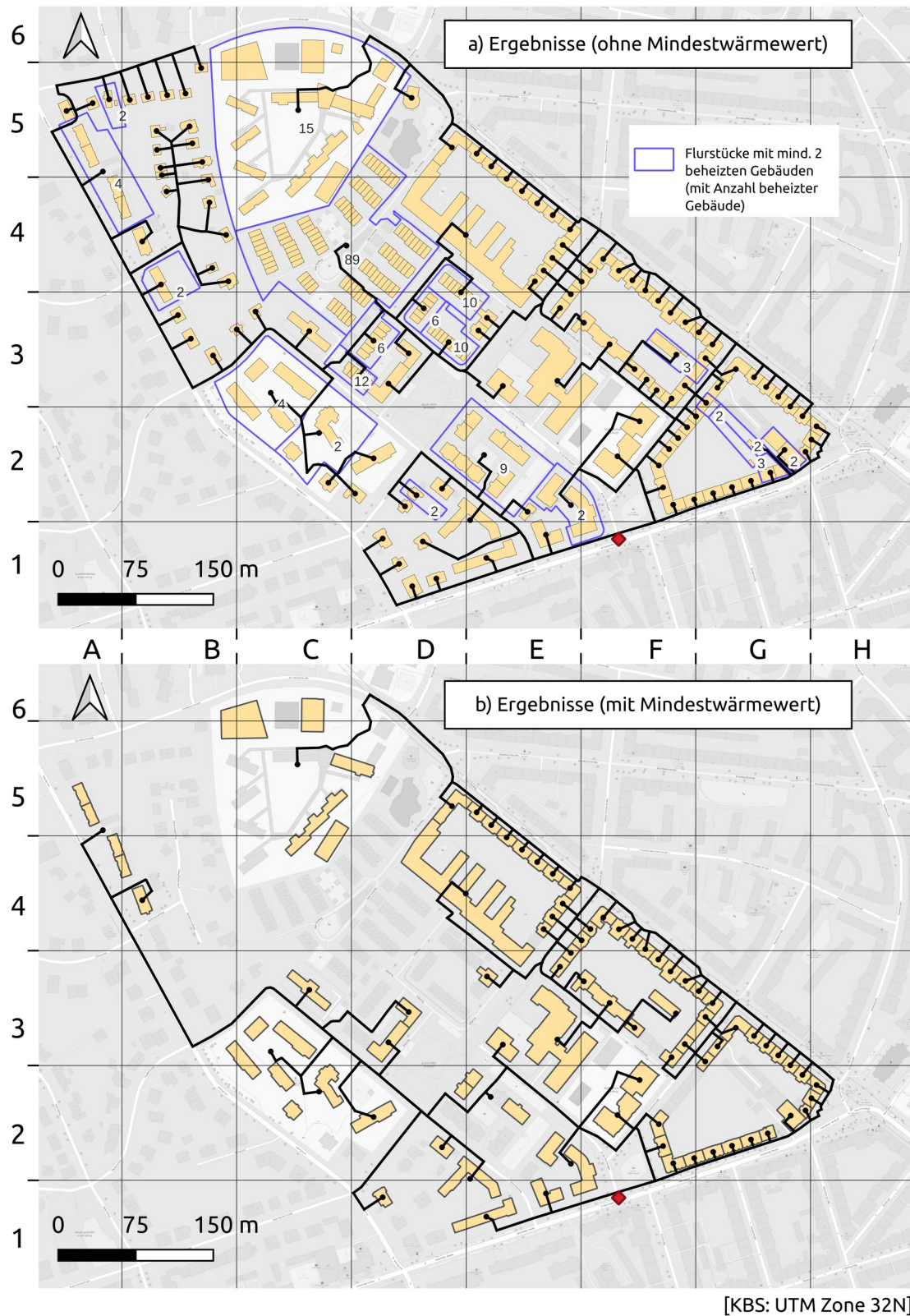
4 Ergebnisse

Im ersten Unterkapitel, [4.1 Erstellter Trassenverlauf](#), werden kurz die Ergebnisse beschrieben, die mit dem hier vorgestellten Modell für das Szenario 1 (siehe [Tabelle 1](#)) erzeugt wurden. Im zweiten Unterkapitel, [4.2 Erstellter Trassenverlauf im Unterschied zu drei Vergleichsnetzen](#), werden die Ergebnisse des Modells für das Szenario 1 mit drei Vergleichsnetzen verglichen, um Rückschlüsse auf die Charakteristika des hier vorgestellten Tools zu ermöglichen. Am Ende des zweiten Unterkapitels wird kurz darauf eingegangen, wie das Netz von Szenario 2 aussieht, für das ein Mindestwärmeleistungswert von >25 kW angewendet wurde.

4.1 Erstellter Trassenverlauf

Der Output des vorgestellten Modells ist ein GIS-Linien-Layer, dessen Objekte die einzelnen Trassenabschnitte darstellen. Als Attribute sind neben der Gesamtlänge des Netzes für jeden Trassenabschnitt eine Identifizierungsnummer und die jeweilige Länge des Abschnittes gespeichert. Ohne Anwendung eines Wärmeleistungswertes werden durch 125 Anschlusspunkte im AOI, 292 Gebäude angeschlossen. Das entspricht einem Wärmebedarf von 16178,1 MWh/a für das Szenario *unsaniert* und 11061,7 MWh/a für das Szenario *saniert* (siehe [Tabelle 2](#)). Im AOI wurden 29 Gebäude (Garagen) nicht berücksichtigt, da diese laut des Wärmekatasters keinen Wärmebedarf haben. Von den 125 Flurstücken mit beheizten Gebäuden haben 16 % mindestens zwei beheizte Gebäude. Vor allem im Norden bis in die Mitte des Untersuchungsgebietes (siehe [Abbildung 7a](#) die Bereiche D3, D4, C4 und C5) wurden daher mehrere Gebäude über einen gemeinsamen Anschlusspunkt angeschlossen. Davon abgesehen sind Flurstücke mit mehreren beheizten Gebäuden im Untersuchungsgebiet gleichmäßig verteilt. Das Netz erreicht eine Gesamtlänge von 6295,9 m. Das ergibt eine Wärmelinien-dichte von 2,57 MWh/m*a (Szenario *unsaniert*) beziehungsweise 1,76 MWh/m*a (Szenario *saniert*).

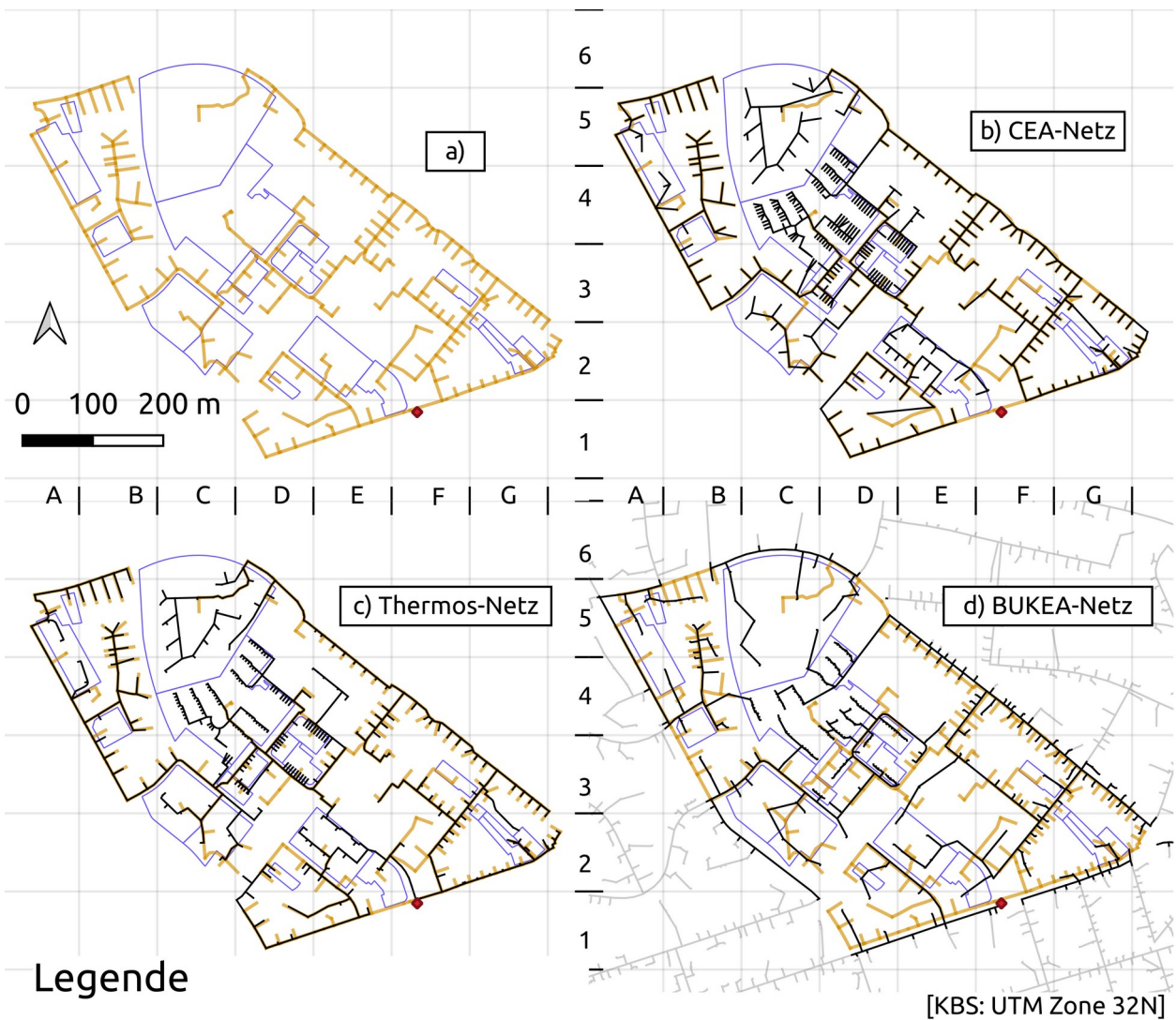
Die Trassenführung zeichnet den Verlauf der größeren Straßen nach. Von diesen Hauptleitungen zweigen meist senkrecht viele kurze, gerade Hausanschlussleitungen ab. Dies ist vor allem im Osten des AOI bei Reihenhäusern zu beobachten (siehe [Abbildung 7a](#)). Bei Gebäuden, die weiter von der nächsten Straße entfernt liegen, ist die Netzstruktur heterogener. Das ist im Norden und Südwesten des AOI bei freistehenden Gebäuden zu beobachten. Dort sind die Anschlussleitungen zum Teil keine Geraden mehr, weil hier die Leitung entlang von gebogenen Fußwegen verlaufen. Es zeigt sich, dass die unterschiedlichen räumlichen Strukturen des AOI unterschiedliche Trassenführung hervorrufen. Die Verlängerung der Anschlussleitungen um 1 m (siehe Seite [28](#)) beeinflusst den Trassenverlauf nicht, da diese Verlängerung an keiner Stelle Teil des finalen Netzes ist.



Legende

- ◆ Waermequelle
- Anschlusspunkte
- Wärmenetz
- angeschlossene Gebäude

Abbildung 7: Trassenverläufe für das Untersuchungsgebiet, erstellt mit dem hier vorgestellten Modell (a) Szenario 1: Anbindung aller Gebäude, die einen Wärmebedarf haben (b) Szenario 2: Anbindung von Gebäuden mit einer Wärmeleistung von mindestens 25 kW. Hintergrundkarten von OpenStreetMap (o. J.).



Legende

- Netz des erstellten Werkzeugs (ohne Mindestwärmewert)
- Wärmenetz des Vergleichsmodells
- Wärmenetz außerhalb des Untersuchungsgebiets
- ◆ Wärmequelle
- Flurstücke die mind. 2 beheizte Gebäude haben

Abbildung 8: Vergleich des erstellten Trassenverlaufes mit drei Referenznetzen für das Untersuchungsgebiet: (a) Trassenverlauf des hier erstellten Modells (ohne Mindestwärmewert) (b) Netz, das mit der Software City Energy Analyst erstellt wurde (c) Netz, das mit der Software Thermos erstellt wurde (d) ‚hypothetisches Wärmenetz‘ des Hamburger Wärmekatasters.

4.2 Erstellter Trassenverlauf im Unterschied zu drei Vergleichsnetzen

Zum Vergleich des erstellten Netzes wurde mit den Softwares City Energy Analyst (CEA) (Version 3.37.0) und Thermos (im Juli 2024 aktuelle Webversion) je ein Wärmenetz erstellt. Zudem wurde ein hypothetisches Wärmenetz für Hamburg herangezogen (Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft, 2019), das Teil des öffentlichen Hamburger Wärmekatasters ist und mit der Methodik von Dochev, Muñoz Hidalgo, et al. (2018)

erstellt wurde. Zur Unterscheidung wird das Netz des Hamburger Wärmekatasters als BUKEA-Netz bezeichnet, da die Wärmekatastergeodaten über die Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft Hamburg (BUKEA) erhältlich sind. Zudem wird das Netz, das mit dem erstellten Modell erzeugt wurde, im Folgenden als ‚erstelltes Netz‘ bezeichnet.

Das CEA-Netz und das Thermos-Netz haben Gemeinsamkeiten mit dem erstellten Netz: Die Hauptleitungen sind teilweise identisch, beispielsweise an der Straße, die das AOI nach Nordosten begrenzt. Zudem haben alle drei Netze eine Strahlennetzstruktur. Eine Besonderheit des CEA-Netzes ist, dass die Linien nicht genau den Straßen folgenden, was auf die Anwendung eines GIS-Werkzeugs in der Software CEA zur geometrischen Vereinfachung des Trassenverlaufes schließen lässt. Auffällig sind beim Thermos-Netzes die verkürzten Hausanschlussleitungen.

Das BUKEA-Netz basiert auf vielen kleinen Wärmenetzen, welche die Gebäude innerhalb eines zuvor erstellten Gebäudeclusters vernetzen. Die kleinen Netze wurden verbunden, sodass ein vermaschtes Gesamtnetz entstanden ist. Innerhalb des Untersuchungsgebietes tritt insgesamt eine dieser Vermaschungen auf. Das BUKEA-Netz weist große Unterschiede zum erstellten Netz auf; es gibt nur wenige Stellen, wo die Trassen ähnlich verlaufen. Das BUKEA-Netz ist jedoch auch nicht als Entwurf für eine Trassenplanung gedacht, sondern um Gebiete zu identifizieren, die potenziell ökonomisch sinnvoll erschlossen werden können (Dochev, Peters, et al., 2018). Die größten Unterschiede zum erstellten Netz sind, dass das BUKEA-Netz eine Haus-zu-Haus-Verlegung vorsieht und sich über das AOI hinaus, großflächig über Hamburg erstreckt. Dadurch besitzt das BUKEA-Netz mehrere Zuleitungen, die in das AOI hineingehen (siehe [Abbildung 8d](#)), anstatt wie beim erstellten Netz eine Zuleitung am Quellpunkt im Süden des Untersuchungsgebietes zu haben.

Im erstellten Modell, genauso wie bei der Software Thermos, wurde der Quellpunkt manuell festgelegt. Bei der Software CEA ist das nicht möglich, weshalb sich das CEA-Netz durch die Anbindung des Quellpunktes um circa 50 m verlängern würde. Die Wärmelinienichte würde durch 50 m vernachlässigbar beeinflusst werden, durch eine Netzgesamtlänge von über 9 km.

Das erstellte Netz hat eine Gesamtlänge von 6295,9 m, was kürzer ist als bei den drei Vergleichsnetzen (siehe [Tabelle 2](#)). Das CEA-Netz hat mit 9405,4 m ein um 49 % längeres Netz und damit eine 49 % niedrigere Wärmelinienichte. Das Thermos-Netz ist 22,5 % länger als das erstellte Netz. Das BUKEA-Netz ist nur 13 % länger, was daran liegt, dass zwar jedes Gebäude einen eigenen Anschlusspunkt bekommt, aber eine Haus-zu-Haus-Verlegung verwendet wird. Dadurch wird Netzlänge gespart.

Der prägnanteste Unterschied sind die Anschlusspunkte. Während das erstellte Modell maximal einen Anschlusspunkt pro Flurstück setzt, wird bei den drei Vergleichsnetzen jedes Gebäude einzeln

angeschlossen. Durch die Anzahl der Anschlusspunkte sind die drei Vergleichsnetze länger als das erstellte Netz. Besonders deutlich wird das an den beiden größten Flurstücken (siehe [Abbildung 8](#) in den Bereichen D4, C4, C5). In einem Flurstück (siehe [Abbildung 8](#) großes Flurstück in den Bereichen D4, C4) wurden mit 89 Gebäuden die meisten Gebäude im AOI zusammen angeschlossen. Im größten nördlichen Flurstück (Bereich C5) wurden 15 beheizte Gebäude zusammen angeschlossen. Da beide Flurstücke groß und die vielen Gebäude gleichmäßig darauf verteilt sind, zeigt sich hier deutlich der Unterschied zwischen den verschiedenen Ansätzen zur Erstellung der Anschlusspunkte. In den Flurstücken in der Mitte des AOI sind auch jeweils über 5 Gebäude zusammen angeschlossen. Aufgrund der geringeren Flurstücksgröße ist hier der Unterschied zu den Vergleichsnetzen geringer, aber noch deutlich sichtbar. Da bei 84 % der Flurstücke nur ein Gebäude auf dem Flurstück steht, kann geschlussfolgert werden, dass die Erstellung der Anschlusspunkte pro Flurstück und pro Gebäude für den Großteil der Flurstücke identisch sind. Bei großen Flurstücken fällt die Abweichung jedoch umso mehr ins Gewicht. Wie stark ausgeprägt die Unterschiede durch den neuen Ansatz der Anschlusspunktstellung sind, hängt daher stark von den lokalen Gegebenheiten ab.

Table 2: Übersicht der Ergebnisse für das Untersuchungsgebiet. Für alle Netze wurden die gleichen Wärmebedarfe, basierend auf (Dochev et al., 2020), angenommen.

			Szenario <i>unsaniert</i>		Szenario <i>saniert</i>	
	Gesamtlänge des Netzes	Abweichung gegenüber erstelltem Netz	angeschlossener Wärmebedarf	Wärmelinien-dichte	angeschlossener Wärmebedarf	Wärmelinien-dichte
Netz mit allen Gebäuden im AOI						
erstelltes Netz	6295,9 m	---	16178,1 MWh/a	2,57 MWh/m*a	11061,7 MWh/a	1,76 MWh/m*a
CEA-Netz	9405,4 m	+49,4 %	16178,1 MWh/a	1,72 MWh/m*a	11061,7 MWh/a	1,18 MWh/m*a
Thermos-Netz	7710,9 m	+22,5 %	16178,1 MWh/a	2,10 MWh/m*a	11061,7 MWh/a	1,43 MWh/m*a
BUKEA-Netz ⁶	7089,0 m	+12,6 %	16178,1 MWh/a	2,28 MWh/m*a	11061,7 MWh/a	1,56 MWh/m*a
Netz für Gebäude mit einer Leitung >25 kW						
erstelltes Netz	4345,2 m	---	12902,5 MWh/a	2,97 MWh/m*a	8499,3 MWh/a	1,96 MWh/m*a

Weniger relevant für die Netzlänge, aber trotzdem ersichtlich ist der unterschiedliche Ort der Anschlusspunkte (siehe Seite 21). In den Fällen, wo auf einem Flurstück nur ein Gebäude steht, sind die Anschlusspunkte des erstellten Modells und die des CEA-Netzes identisch (Gebäudemittelpunkt). Das ist bei Reihenhäusern im nordöstlichen Teil des AOI zu beobachten. Die Hausanschlussleitungen des Thermos- und des BUKEA-Netzes sind in dem Bereich kürzer, da die Leitungen nur bis an den Rand der Gebäude gehen.

⁶ Es wird davon ausgegangen, dass alle Gebäude mit Wärmebedarf im Untersuchungsgebiet angeschlossen sind.

Ein weiterer Unterschied sind unnötig lange Leitungen im erstellten Netz, um einzelne Gebäude anzuschließen. Diese Situation konnte bei zwei räumlichen Konstellationen beobachtet werden. Der erste Fall ist, wenn zwei Anschlussleitungen parallel nah nebeneinander verlaufen, was im erstellten Netz an einer Stelle auftritt. Bei den Vergleichsnetzen treten an dieser Stelle keine parallel verlaufenden Leitungen auf, weil stattdessen eine Leitung zu den Gebäuden führt und sich dort aufteilt. Der zweite Fall ist, wenn die Anschlussleitung zur nächstgelegenen Straße führt, obwohl dadurch das Netz länger wird (siehe [Abbildung 7](#) die Anschlusspunkte im Bereich D5). Optimal wäre in den Fällen, wenn die Hausanschlussleitung zu einer Straße geht, die zwar weiter vom Anschlusspunkt entfernt ist, aber dadurch der Umweg vermieden und die Netzlänge minimiert würden. Bei den drei Vergleichsnetzen tritt diese Situation kaum auf. Die beschriebenen Umwege erhöhen die Gesamtlänge des Netzes und verringern damit die Wärmeliniedichte.

Ergänzend soll dargestellt werden, wie das Netz aussieht, das mit dem hier vorgestellten Modell unter Berücksichtigung eines Wärmeleistungswertes erzeugt wurde. Damit soll untersucht werden, ob das hier vorgestellte Modell auch unter Anwendung der Gebäudefilter-Funktion einen sinnvollen Trassenverlauf erzeugt. Dafür wird das zuvor ausführlich beschriebene Netz ohne Mindestwärmeleistungswert ([Abbildung 7a](#)) mit dem Netz verglichen, das einen Mindestwärmeleistungswert von >25 kW berücksichtigt ([Abbildung 7b](#)).

Durch den Wert von >25 kW Leistung fielen 52 der 125 Anschlusspunkte weg. Auf Flurstücken mit mehreren Gebäuden wurden einzelne kleine Gebäude herausgefiltert, wodurch sich der Ort des Anschlusspunktes (als Schwerpunkt der auf dem Flurstück anzuschließenden Gebäuden) veränderte. Die Netzstruktur blieb jedoch sinnvoll. An Orten, wo bei beiden Netzen die gleichen Gebäude angeschlossen sind, sind die Trassenverläufe ähnlich bis identisch (siehe Reihenhäuser im nordöstlichen Teil des AOI). Die Anwendung des >25 kW Wärmeleistungswertes erhöhte für beide Szenarien (*unsaniert* und *saniert*) die Wärmeliniedichte um mehr als 10 % (siehe [Tabelle 2](#)).

5 Diskussion

Im Kapitel [5.1 Diskussion der Ergebnisse](#) werden zunächst die beschriebenen Ergebnisse im Kontext der Hypothesen diskutiert. Anschließend werden im Kapitel [5.2 Anwendungsraum des erstellten Modells](#) die gesetzten Ziele ausführlich evaluiert und es wird darauf eingegangen, für welche Gebiete das erstellte Modell angewendet werden kann.

5.1 Diskussion der Ergebnisse

Zunächst werden die Aspekte der Ergebnisse diskutiert, die der Hypothese A zuzuordnen sind. Danach wird auf die Aspekte zur Hypothese B eingegangen.

5.1.1 Diskussion von Aspekten der Hypothese A

In der Hypothese A wird die Erstellung eines Trassenverlaufes adressiert, um anhand dessen die Länge und Wärmelinienichte des Netzes zu berechnen. Dieser Logik folgend werden der Trassenverlauf, die Netzlänge und die Wärmelinienichte diskutiert. Abschließend wird die Hypothese A bewertet.

Trassenverlauf

Hervorzuheben ist die Ähnlichkeit des hier erstellten Trassenverlaufes zum CEA-Netz und zum Thermos-Netz, abgesehen von den Flurstücken in den Bereichen D4, C4, C5 (siehe [Abbildung 8](#)). Im Kapitel Ergebnisse wurde aufgezeigt, dass es zwischen dem erstellten Netz und dem BUKEA-Netz größere Unterschiede in der Trassenführung gibt.

Bezüglich der Netzstruktur lässt sich sagen, dass das Modell aufgrund des v.net.steiner-Algorithmus ein Strahlennetz als Hauptverteilung erzeugt. In QGIS können manuell Leitungen hinzugefügt werden, sodass das Strahlennetz zu einem Maschen-/Ringnetz wird, was die Netzlänge und die Versorgungssicherheit erhöht. Dieser Ansatz wird auch von Schmidt und Stange (2021) angewendet. Mit der Rechenleistung eines handelsüblichen Laptops aus 2011 scheint das erstellte Modell nur Netze für kleinere Gebiete untersuchen zu können, was nach Doetsch et al. (1998, S. 37) für die Strahlennetz-Variante spricht. Vorteilhaft ist bei dem Strahlennetz die geringe Netzlänge, nachteilig ist die geringere Versorgungssicherheit von Strahlennetzen (Doetsch et al., 1998, S. 37).

In der Planung bei einem Wärmeversorger wird darauf geachtet, dass die einzelnen Äste des Strahlennetzes nicht zu lang werden, um die Versorgungssicherheit zu erhöhen. Auch im Untersuchungsgebiet hat das Modell keine einzelnen Äste erzeugt, die länger sind als nötig. Prinzipiell berücksichtigt das Modell diesen Aspekt jedoch nicht. Es kann daher sein, dass das Modell lange Äste erzeugt und im Falle einer Störung dann viele Kund:innen betroffen wären.

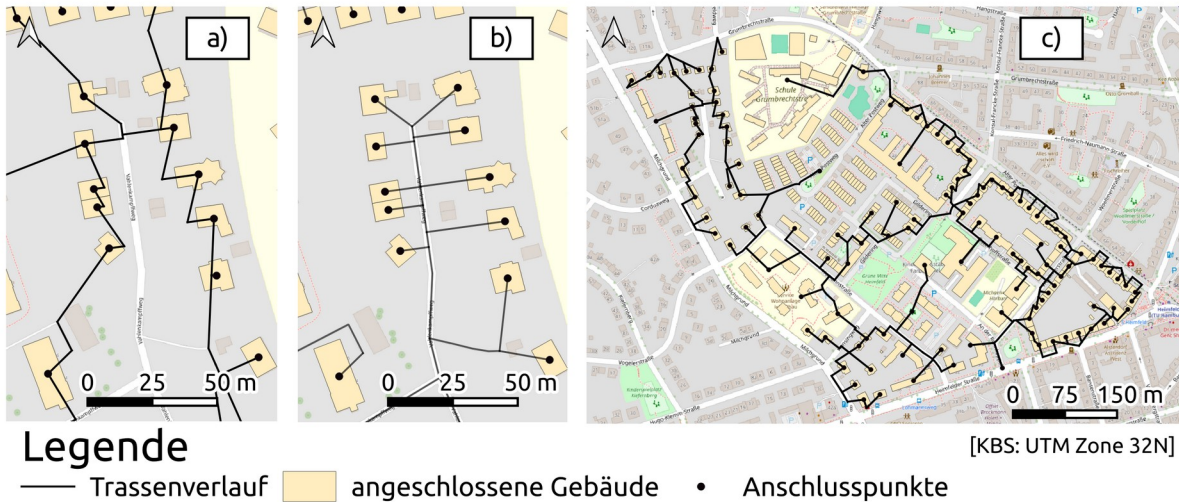


Abbildung 9: (a) Ausschnitt des Trassenverlaufes bei einem Grundnetzwerk mit 3 möglichen Hausanschlussleitungen je Anschlusspunkt (b) Trassenverlauf bei einem Grundnetzwerk mit einer möglichen Hausanschlussleitung je Anschlusspunkt (c) Trassenverlauf für das ganze Untersuchungsgebiet bei einem Grundnetzwerk mit 3 möglichen Hausanschlussleitungen je Anschlusspunkt. Hintergrundkarten von OpenStreetMap (o. J.)

Die im Modell verwendete Standardtrassenführung zur Unterverteilung ist mit höheren Investitionskosten verbunden, aber bietet viel Flexibilität, weitere Gebäude anzuschließen (Doetsch et al., 1998, S. 38). Wie die Ergebnisse gezeigt haben, entstehen aber auch unnötig lange Hausanschlussleitungen im Modell. Das ist der Fall, weil vom Hausanschlusspunkt die Leitung immer zur nächsten Straße geht, was keine Flexibilität bietet und zu suboptimalen Trassenführungen führen kann. Daher wurde im Rahmen der Arbeit getestet, ob es sinnvoller ist, dass das Grundnetzwerk für jeden Anschlusspunkt nicht nur eine Möglichkeit für die Hausanschlussleitung hat (also nur eine Linie zur nächsten Straße), sondern von jedem Anschlusspunkt zwei/drei/vier mögliche Hausanschlussleitungen abgehen zu den zwei/drei/vier nächsten Straßen. Mit dem verwendeten Steinerbaum-Algorithmus hat dies jedoch dazu geführt, dass der Algorithmus nicht eine der mehreren möglichen Anschlussleitungen vollständig verwendet hat, sondern für einen Anschlusspunkt eine Kombination aus mehreren Hausanschlussleitungen verwendet hat. Das erzeugte an manchen Stellen eine Zickzack-Struktur. Lokal begrenzt sind dadurch kürzere Trassenführungen entstanden (siehe [Abbildung 9a](#) und [9b](#)). Nachteilig war, dass das Netz insgesamt kaum noch der Straßenstruktur folgt (siehe [Abbildung 9c](#)). Folglich wären mehr Durchleitungsrechte durch Grundstücke nötig, weshalb dieser Ansatz wieder verworfen wurde.

Eine Haus-zu-Haus-Verlegung oder eine Kellerverlegung ist mit dem erstellten Modell nicht möglich. Eine Haus-zu-Haus-Verlegung ermöglicht zwar kurze Netze, sorgt wegen der nötigen Durchleitungsrechte für die Grundstücke aber für mehr Unsicherheit in der Planung. Auch eine

Kellerverlegung kann sinnvoll sein, vor allem für Reihenhäuser im Osten des Untersuchungsgebietes könnten so Kosten für spezielle Rohre und Tiefbauarbeiten gespart werden (Doetsch et al., 1998, S. 38, 42). Öffentlich sind für Hamburg keine Geodaten dazu vorhanden, welche Häuser Keller besitzen. Nach Angaben eines Wärmeversorgers sei es regional unterschiedlich, wie wahrscheinlich eine Kellerverlegung möglich ist, was eine pauschale Annahme wertlos macht. Wegen fehlender Informationen zu Kellern und der Planungsunsicherheit bei Durchleitungsrechten (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 111–112) wurden eine Haus-zu-Haus-Verlegung oder eine Kellerverlegung nicht implementiert.

In der Praxisliteratur können Ausbautappen vorgesehen sein, was Implikationen für die Netzstruktur hätte (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 105). Das ist für das Untersuchen der Hypothese A relevant, weil dort explizit der Ausbau von Wärmenetzen adressiert wird und nicht etwa eine Nachverdichtung. Solche Ausbautappen werden vom erstellten Modell nicht berücksichtigt. Wie groß der Einfluss solcher Ausbautappen auf die Netzlänge ist, wäre zu untersuchen.

Es kann zusammengefasst werden: Das erstellte Modell ist unflexibel in der Trassenführung durch die Festlegung auf ein Strahlennetz für das Hauptnetz und eine Standardtrassenführung für die Unterverteilung. Das verhindert eine optimale Trassenführung, wodurch die Versorgungssicherheit und eine minimale Netzlänge beeinträchtigt sein können.

Netzlänge

Abgesehen davon wurde in den Ergebnissen beschrieben, dass an einigen Stellen im Untersuchungsgebiet unnötige Umwege in der Trassenführung aufgetreten sind (siehe Seite 35), was die Wärmeliniendichte unnötig verringert. Diese Umwege könnten behoben werden, indem die Hausanschlussleitung nicht nur zur nächsten Straße, sondern auch zur zwei- bis drittnächsten Straßen gehen kann, oder indem der Trassenverlauf nachträglich durch einen GIS-Algorithmus vereinfacht würde. Hier muss darauf hingewiesen werden, dass nach Aussage eines Wärmeversorgers die Vereinfachung im CEA-Netz für das Untersuchungsgebiet nicht zu einem realistischeren Trassenverlauf führe.

Insgesamt traten diese Umwege nur an 10 Stellen auf. Für die Netzlänge relevanter ist daher die Anzahl der Anschlusspunkte (ein Anschlusspunkt pro Flurstück oder ein Anschlusspunkt pro Gebäude), da dieser Aspekt zwangsläufig überall im Untersuchungsgebiet auftritt, wo Wärmesenken angeschlossen werden (also 125 Mal). Die gewählte Methode (ein Anschlusspunkt je Flurstück) führt zu einem deutlich kürzeren Netz als bei einem Anschlusspunkt je Gebäude. Das

zeigt sich im Vergleich mit den drei Referenzmodellen, die jedes Gebäude anschließen (siehe [Tabelle 2](#)).

Dénarie et al. (2021) zufolge überschätzen die Modelle in der Literatur die Netzlänge um 5-10 % im Vergleich zu realen Netzen. Hingegen in der Publikation, auf der das BUKEA-Netz beruht, wird die Netzlänge um 3-13 % unterschätzt (Dochev, Peters, et al., 2018, S. 415). Auch Dénaire et al. (2021) bewerten das Wärmenetzmodell, indem die Ergebnisse mit realen Netzen verglichen wurden. Dies war im Rahmen der Arbeit nicht möglich, da aus Datenschutzgründen keine realen Daten zu realen Trassenverläufen in Hamburg zur Verfügung standen. Somit wird angenommen, dass die Längenunterschätzung des BUKEA-Netzes auch speziell für das Untersuchungsgebiet bei 3-13 % liegt. Mit den Ergebnissen aus [Tabelle 2](#) ergibt sich damit für das hier erstellte Modell eine Unterschätzung der Netzlänge von 16-26 %. Das liegt in dem Genauigkeitsbereich von ± 25 % den die Praxisliteratur für die Kostengenauigkeit in der Vorstudie angibt (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 109). Auch wenn die Genauigkeit nicht eindeutig belegt werden kann, da der systematische Vergleich mit realen Netzdaten fehlt, ist eine zentrale Erkenntnis: Das Modell unterschätzt die Netzlänge. Die Unterschätzung ist auf die Erstellung der Anschlusspunkte je Flurstück anstatt je Gebäude zurückzuführen (siehe [Abbildung 8](#)). Dadurch werden im Untersuchungsgebiet anstatt der 321 Gebäude nur 125 Flurstückanschlusspunkte angebunden. Diese potenzielle Unterschätzung in der Netzlänge überträgt sich auf die Wärmelinien-dichte, die aus der Netzlänge berechnet wird. Hinzu kommen bei der Wärmelinien-dichte Unsicherheiten im Bereich von 20 % durch die Ermittlung des Wärmebedarfes, für das verwendete Wärmekataster (siehe Dochev et al., 2020, S. 250). Die Unsicherheit des Wärmekatasters ist ähnlich zu anderen Wärmebedarfsmodellen und hat eine ausreichende Qualität für Planungsentscheidungen, die mehrere Gebäude betreffen (Reinhart & Cerezo Davila, 2016, S. 199).

Wärmelinien-dichte

Mit der Untersuchung eines konkreten Gebietes in Hamburg sollten die methodischen Aspekte des Modells, die in den zwei vorherigen Abschnitten diskutiert wurden, evaluiert werden. Nichtsdestotrotz soll im Folgenden kurz beleuchtet werden, was die errechneten Wärmelinien-dichten für das konkrete Gebiet aussagen können: Zur Bewertung, ob der Ausbau eines Wärmenetzes in einem Gebiet ökonomisch sinnvoll ist, wird von Dochev, Peters, et al. (2018, S. 415–417) als konservativer Wert eine Wärmelinien-dichte von mindestens 2,5 MWh/a*m angesetzt. Andere Publikationen gehen von niedrigeren Werten aus: 1,5 MWh/a*m in (Jalil-Vega & Hawkes, 2018, S. 344) und 2 MWh/a*m in (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 108). Für das Szenario *unsaniert* liegt die Wärmelinien-dichte des erstellten Netzes für das Untersuchungsgebiet mit 2,57 MWh/m*a über diesen Werten und gilt daher als geeignet. Für das Szenario *saniert*, was

einen zukünftigen, verringerten Wärmebedarf annimmt, liegt die Wärmelinien-dichte mit 1,76 MWh/m*a zwischen den Grenzwerten aus der Literatur. Es wäre für das Szenario *saniert* eine genauere Analyse nötig, ob ein Wärmenetz ökonomisch sinnvoll wäre. Das ist in Übereinstimmung mit den Werten der Wärmebezugsdichte. Mit dem Szenario *unsaniert* gilt das Gebiet basierend auf einer Wärmebezugsdichte von 68,2 kWh/a*m² als „bedingt geeignet“ und an der Grenze zu „geeignet“ (Good et al., 2022, S. 126). Mit dem Szenario *saniert* gilt das Gebiet mit 46,6 kWh/a*m² als „ungeeignet“ (Good et al., 2022, S. 126).

Es ist hier jedoch wichtig zu betonen, dass das erstellte Modell keine absolute Bewertung liefern kann, ob ein Wärmenetz für ein Gebiet geeignet ist oder nicht. Denn dafür wäre eine verlässliche Berechnung der Wärmelinien-dichte sowie ein Vergleich mit anderen klimaneutralen Heiztechnologien nötig, wie es Erdman et al. (2021) untersucht haben. Eine Abwägung der Heiztechnologien und Kosten kann beispielsweise für Hamburg den Geodaten „Wärmenetzeignungsgebiete Hamburg“ (Freie und Hansestadt Hamburg Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft, 2023) des Hamburger Wärmekatasters entnommen werden. Darin wurde der östliche Teil des Untersuchungsgebietes als „geeignet“ für ein Wärmenetz und der westliche Teil als „nicht geeignet“ eingestuft. Das deckt sich mit der Wärmelinien-dichte des erstellten Modells. Aufgrund der geringen Größe des Untersuchungsgebiets hat die Übereinstimmung der Hamburger Wärmenetzeignungsgebiete mit den Modellergebnissen eine begrenzte Aussagekraft.

Zudem gilt für die Wärmelinien-dichten dieser Arbeit, dass durch die Unsicherheit der Längenberechnung zusammen mit der Unsicherheit des Wärmekatasters eine absolute Bewertung wegen zu großer Unsicherheiten nicht vorgenommen werden sollte. Daher ist es wichtig: Das erstellte Modell sollte bei Verwendung von Wärmekatastern mit Abweichungen im Bereich von 20 %, zur Untersuchung der Wärmenetzeignung lediglich vergleichend genutzt werden.

Prüfen der Hypothese A

Mit der Anerkennung der Unsicherheit bezüglich der Netzlänge und Wärmelinien-dichte soll nun die Hypothese A geprüft werden. Die Hypothese A lautet: „Innerhalb von QGIS lässt sich eine vereinfachte Planung des Trassenverlaufes für den Ausbau von Wärmenetzen automatisieren.“ Wie Methodik- und Ergebnisteil gezeigt haben, kann das Modell innerhalb von QGIS genutzt werden und erzeugt auf automatisierte Weise einen Trassenverlauf. Dass der Trassenverlauf auch für den Ausbau von Wärmenetzen geeignet ist, lässt sich einerseits dadurch bestätigen, dass Gebiete untersucht werden können, in denen bisher kein Wärmenetz vorhanden ist. Andererseits kann es dadurch bestätigt werden, dass eine Wärmelinien-dichte berechnet wird, die für die Ausbauplanung

von Interesse ist. Die Perspektive des Ausbaus bleibt jedoch beschränkt, da wie erwähnt mögliche Ausbaustufen keine Berücksichtigung finden.

Damit ist die Hypothese A bestätigt für Gebiete von maximal 0,24 km² und unter dem Vorbehalt der Unsicherheit der Wärmelinienberechnung.

5.1.2 Diskussion von Aspekten der Hypothese B

Die Hypothese B adressiert die Kriterien des Modells, welche in diesem Kapitel evaluiert werden.

Darauf aufbauend wird die Hypothese B geprüft.

Anschlusspunkte pro Flurstück

Das Kriterium mit dem größten Einfluss auf den Trassenverlauf und auf die Netzlänge (siehe Seite 38) ist die Erstellung der Anschlusspunkte. Wie im Kapitel 3.3.2 [Randbedingungen und getroffene Annahmen](#) beschrieben, werden die Flurstücke als Ersatzparameter dafür verwendet, welche Gebäude sich zusammen anschließen lassen. Der möglicherweise daraus entstehende Fehler des erstellten Modells ist systematisch, da er im Programmcode des Modells fest verankert ist. Eine nachträgliche Korrektur der Netzlänge wäre schwierig, da angenommen wird, dass die Unterschätzung der Netzlänge von mehreren Faktoren abhängt: Wie die Ergebnisse zeigen, hängt die Unterschätzung der Netzlänge vor allem von der Größe der Flurstücke, der Anzahl der gemeinsam anzuschließenden Gebäude und der Verteilung der Gebäude auf den Flurstücken ab.

Bei den Orten der Anschlusspunkte unterscheiden sich das erstellte Netz und die Referenznetze, da das erstellte Modell auf Flurstückebene und die Referenzmodelle auf Gebäudeebene operieren. Es ist wichtig anzumerken, dass die Übergabestationen, repräsentiert durch die Anschlusspunkte, innerhalb eines Gebäudes liegen müssen (Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 96). Mit der Herangehensweise des erstellten Modells von Anschlusspunkten je Flurstück kann der Anschlusspunkt jedoch auch außerhalb von Gebäuden liegen. Es wird davon ausgegangen, dass dadurch in der Praxis sowohl längere als auch kürzere Hausanschlussleitungen entstehen können und es sich im Mittel ausgleicht. Durch den begrenzten Rahmen der Arbeit wurde diese Annahme und der Einfluss der Anschlusspunkte auf die Netzlänge nicht untersucht.

Gebäudeauswahl

Nun wird die Modellfunktion diskutiert, womit Gebäude geringen Wärmebedarfs von der ersten Planung ausgeschlossen werden können. Dass der verwendete Wärmewert von >25 kW Leistung sich auf die Gebäudeebene bezieht, aber im erstellten Modell die Anschlusspunkte pro Flurstück erstellt werden, hat zwei Folgen: Erstens wäre zu diskutieren, ob im Falle von Anschlusspunkten auf Flurstückebene es sinnvoller wäre, den Wärmewert in modifizierter Form ebenfalls auf die

Flurstücke zu beziehen. Zweitens wurde die Annahme, dass Gebäude des gleichen Flurstückes über eine gemeinsame Heizanlage verfügen, außer Kraft gesetzt, wenn die Filterfunktion angewendet wird. Es wird stattdessen angenommen, dass nur die Gebäude eine gemeinsame Heizanlage besitzen, die oberhalb des Wärmeleistungswertes sind und auf dem gleichen Flurstück liegen.

Die Filterfunktion des Modells hat, abhängig vom gesetzten Wärmeleistungswert, unterschiedlich starken Einfluss auf den Trassenverlauf. Im Falle eines Wärmeleistungswertes von >25 kW ist ein deutlicher Unterschied im Trassenverlauf sichtbar (siehe [Abbildung 7a](#) und [7b](#)). Beide Netze (mit und ohne Wärmeleistungswert) unterschieden sich im Untersuchungsgebiet jedoch nicht im Bezug darauf, wie realitätsnah der Trassenverlauf ist. Daraus kann geschlossen werden, dass die Filterfunktion die Ergebnisqualität nicht verändere. Bezüglich der Länge des Netzes haben Dénarié et al. (2021, S. 65) allerdings festgestellt, dass der Fehler der berechneten Netzlänge gegenüber der realen Netzlänge zunimmt, je weniger Gebäude eines Gebietes angeschlossen werden. Ob das auch für das hier erstellte Modell zutrifft, müsste noch überprüft werden. Die Filterfunktion des Modells vergrößert demzufolge potenziell die Unsicherheit der Berechnung. Um diese Unsicherheit auszuschließen, kann die Funktion deaktiviert werden, indem der Wert auf null gesetzt wird. Durch die Vorteile, einen möglichen externen Mindestwärmewert zu berücksichtigen, die Wärmelinien dichte zu erhöhen und die Möglichkeit, die Funktion zu deaktivieren, wird die Filterfunktion als sinnvolles Kriterium des Modells eingestuft. Davon unabhängig haben die Ergebnisse gezeigt, dass das Netz mit Anwendung eines Wärmeleistungswertes von >25 kW eine um mehr als 10 % höhere Wärmelinien dichte hatte als das Netz, das alle Gebäude anschließt. Daraus lässt sich schließen, dass die Fokussierung auf Gebäude mit hohem Wärmebedarf ein erster Optimierungsansatz sein kann, um die Wärmelinien dichte eines Gebietes zu erhöhen. Zudem kann der Mindestwärmeleistungswert zu einer schnellen Dekarbonisierung beitragen (siehe Seite [20](#)).

Erschließungsgrad und Prüfen der Hypothese B

Die Modellfunktion, den Anschlussgrad einzubeziehen, wurde im Rahmen der Arbeit nicht praktisch untersucht. Nachteilig ist die Funktion jedoch nicht, weil sie wie beschrieben deaktiviert werden kann, indem der Anschlussgrad auf 100 % gesetzt wird. Es wird aber angenommen, dass die Berücksichtigung des Anschlussgrades eine Annäherung an die Realität darstellt. Wenn die Anschlusspunkte zufällig ausgewählt werden, sind folglich die Ergebnisse unterschiedlich, trotz gleicher Eingabedaten und -parameter.

Hier sei nochmal angemerkt, dass viele Kriterien für die Bearbeitung der Hypothese B unberücksichtigt geblieben sind, auch Praxiskriterien. Deswegen sind die Ergebnisse des Modells nur als erste Abschätzung eines Trassenverlaufes anzusehen, nur nicht als erster Entwurf.

Trotz dieser Limitation konnten alle Aspekte der Hypothese B („Bei der automatisierten Ermittlung des Trassenverlaufes können die Praxiskriterien von Seite 9 berücksichtigt werden“) bestätigt werden: Die Implementierung der Praxiskriterien wird durch die Berücksichtigung einer Mindestwärmeleistung, eines Erschließungsgrades und der Erstellung der Anschlusspunkte pro Flurstück bestätigt. Somit können alle Aspekte der Hypothese B bestätigt werden.

Im Nachhinein scheint es sinnvoller, wenn die Hypothese B und die Hypothese A mit konkreteren Aussagen formuliert worden wären, um deren Aussagekraft zu erhöhen. Dass es in der Hypothese A bei der Formulierung „Trassenverlauf für den Ausbau von Wärmenetzen“ um die Berechnung der Wärmelinien-dichte geht, wurde im Kapitel [2.5 Forschungsbedarf und Hypothesen](#) konkretisiert, aber nicht mit in die Hypothesen aufgenommen. Genauso wären die Hypothesen aussagekräftiger, wenn konkrete planungspraktische Kriterien und die Größe des Untersuchungsgebiets in Hypothese A und B aufgenommen worden wären. In dem Zuge hätte Hypothese A aufgeteilt werden können, um mit jeder Hypothese einen Aspekt zu fokussieren.

Evaluation der Datengrundlage, Reliabilität und Ziele

Dieser Abschnitt beleuchtet, vor welchem Hintergrund die beiden Hypothesen bestätigt wurden, mit Fokus auf die Datengrundlage und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Zudem werden die Ziele aus dem Kapitel [2.5 Forschungsbedarf und Hypothesen](#) evaluiert.

Die Unsicherheit, wie realitätsnah der erzeugte Trassenverlauf für das AOI tatsächlich ist, wurde durch die Limitationen in den vorherigen Abschnitten der Diskussion dargelegt. Allgemein hängt die Unsicherheit auch von den verwendeten Geodaten ab. Die Ergebnisse einer GIS-Analyse sind nur so gut wie die zugrunde liegenden Geodaten (von Wehrden & Chauhan, 2024). Diese Daten sind als Primärmodell der Wirklichkeit jedoch Produkt eines normativen Generalisierungsprozesses mit Fokus auf bestimmte Aspekte (Lange, 2013, S. 278; von Wehrden & Chauhan, 2024). Im Falle der Arbeit sind die Geodaten auf infrastrukturelle Merkmale fokussiert. Die Generalisierung dient dazu, die Daten zu vereinfachen, was jedoch zu Ungenauigkeiten führt. Im Vergleich des erstellten Netzes mit den Vergleichsnetzen wurde beispielsweise festgestellt, dass ein einzelnes Gebäude des Wärmekatasters, in den von CEA und Thermos genutzten OSM-Daten in separate Gebäude unterteilt ist. Am Rande sei erwähnt, dass neben dem Aspekt der Normativität die in der Arbeit verwendeten Geodaten beispielsweise von fehlender Aktualität (vorrangig die Straßendaten von OSM), ungenauer Georeferenzierung und fehlerhafter Kartierung betroffen sein können. Für eine schnelle, erste Einschätzung des Trassenverlaufes ist die Qualität der verwendeten Daten ausreichend, wie Kapitel [3.4.2 Eingabedaten](#) geschlussfolgert wurde. Die Ergebnisse des Modells haben diese Bewertung der Datengrundlagen nicht widerlegt. Zudem ging es in dieser Arbeit nicht

um die Ergebnisse an sich, sondern darum, die Anwendbarkeit des Modells zu demonstrieren. Hingegen in der realen Anwendung spielt die Datenbasis eine entscheidende Rolle.

Die Reliabilität der erzeugten Trassenverläufe ist (im Gegensatz zur diskutierten Unsicherheit) hoch, da keine Datenerhebung stattgefunden hat, sondern lediglich Daten algorithmisch verarbeitet wurden. Dies gilt jedoch nicht, wenn andere Eingabeparameter als hier in der Arbeit verwendet werden, vor allem wenn der Erschließungsgrad unter 100 % liegt und damit eine zufällige Auswahl stattfindet. Die Unsicherheit und Reliabilität der Netzlänge entsprechen größtenteils denen des Trassenverlaufes, weil die Netzlänge ein Produkt des Trassenverlaufes ist. Genauso ist es bei der Wärmelinienichte, wobei hier als Unsicherheit die Berechnung von Wärmebedarfen hinzukommt. Für die durchgeführte Untersuchung ist die Unsicherheit (bezüglich auf die Eingabedaten) der Wärmelinienichte stärker durch die Wärmebedarfsberechnung (20 %) geprägt, bedingt durch die Art der Berechnung, als durch die Georeferenzierung der zugrunde liegenden GIS-Daten.

Neben dem Untersuchen der Hypothesen wurden für die Arbeit noch weitere Ziele gesteckt, deren Erreichung hier evaluiert wird. Das Hauptziel ist es, ein Werkzeug zu erstellen, das die schnelle erste Untersuchung von Gebieten vereinfacht. Der Schnelligkeitsaspekt wurde durch eine Rechenzeit von etwa 15 Sekunden für das Untersuchungsgebiet erreicht. Zum Vergleich: Die Modelle aus der Literatur rechnen beispielsweise 10 Minuten für 160 Gebäude (Wack et al., 2023) und unter 1 Stunde für 545 Anschlusspunkte und 3 Szenarien (Salenbien et al., 2023, S. 6). Die meiste Rechenzeit des hier vorgestellten Modells benötigt der Schritt zur Berechnung des Steinerbaums.

Zudem soll das Modell einfach (ohne Programmierkenntnisse) anwendbar sein, was ebenfalls erfüllt ist: Das letztendlich erstellte Modell kann genutzt werden, indem der Programmcode lokal abgespeichert wird (Dateiendung „.model3“). Diese Datei kann über die grafische Oberfläche in QGIS geöffnet werden, um die Eingabemaske aufzurufen und das Modell auszuführen und/oder weiterzuentwickeln. Dies ist einfacher und schneller als bei Thermos und CEA, wo mehrere Berechnungen zur Vorbereitung der Trassenerstellung ausgeführt werden müssen, deren Laufzeit zum Teil im zweistelligen Minutenbereich lag für das vorgestellte Untersuchungsgebiet. Auch die Erweiterbarkeit des erstellten Modells ist niedrigschwelliger als bei CEA, Thermos und planheat, da das erstellte Modell über die grafische Programmieroberfläche von QGIS verändert werden kann, wozu grundlegende Kenntnisse in QGIS nötig sind, aber keine Programmierkenntnisse. Damit ist das erstellte Modell für mehr Planende zugänglich. Ein weiteres Ziel ist, ein an die Bedürfnisse aus der Praxis angepasstes Modell zu erstellen, was durch die Implementierung der Praxiskriterien erreicht wurde. Das Ziel, mit dem Modell städtische Gebiete bezüglich ihrer Tauglichkeit für Wärmenetze zu vergleichen, wurde nicht erreicht, da die Wärmelinienichte noch nicht automatisch

berechnet wird. Die Berechnung der Wärmelinien-dichte kann jedoch nachträglich durchgeführt werden. Es war zudem geplant, Untersuchungsgebiete in der Größenordnung von Stadtteilen analysieren zu können. Das Ziel wurde nicht erreicht, da das Modell bisher nur für Gebiete mit bis zu 0,24 km² funktioniert. Ein erster Test mit einem 1,3 km² großen Gebiet deutet darauf hin, dass dieses Gebiet zu groß für das Modell mit der Rechenleistung eines handelsüblichen Laptops aus 2011 ist. Das Modell dient wie geplant als Beispiel dafür, wie planungspraktische Kriterien als open-source Code implementiert werden können.

Zur Zielstellung der Arbeit soll nicht unerwähnt bleiben, dass es schon eine Vielzahl verschiedener Planungswerkzeuge für Fernwärme gibt (Höffner, 2022). Um Arbeit nicht doppelt zu machen, hätte in dieser Arbeit ein detaillierter Überblick über bestehende QGIS- und Python-Werkzeuge und deren Funktionalitäten erstellt werden müssen. Eines dieser Werkzeuge hätte sodann um die fehlenden Praxiskriterien ergänzt werden müssen. Durch den begrenzten Rahmen der Arbeit war nicht genug Zeit sich in die bestehenden Werkzeuge einzuarbeiten und die nötigen Programmierkenntnisse aufzubauen, um den Code zu erweitern. Zudem hat die Entwicklung neuer Modelle mit ähnlichen Zielen den wissenschaftlichen Mehrwert, dass damit bestehende Modelle überprüft werden können.

Davon unbeeinflusst lässt sich für dieses Kapitel zusammenfassen, dass die Hypothese A und die Hypothese B bestätigt wurden und dass die gesetzten Ziele zum Großteil erfüllt wurden.

5.2 Anwendungsraum des erstellten Modells

Für die Planung mit dem erstellten Modell ist es von Interesse, für welche geografischen Gebiete das Modell verlässliche Ergebnisse liefert. Das Modell wurde nur für das Untersuchungsgebiet (Kapitel 3.2 [Untersuchungsgebiet](#)) getestet. Daher kann die Frage nicht sicher beantwortet werden, soll aber zumindest im Folgenden diskutiert werden.

Die Heterogenität des Untersuchungsgebietes (frei stehende Häuser und Reihenhäuser, große und kleine Flurstücke, gerade und gebogene Straßenverläufe) erlaubte es, das Modell auf verschiedene Siedlungsstrukturen zu testen. Laut ALKIS ist das Gebiet ein gemischtes Gebiet für Wohnen, Dienstleistung, Handel, Bildung und Forschung sowie Grünanlagen (Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (LGV) Hamburg, 2020). Somit ist das Modell für Gebiete mit dieser Nutzung ausgelegt, aber beispielsweise nicht für Industriegebiete.

Damit das Modell für ein kleines Untersuchungsgebiet (circa 0,24 km²) funktioniert, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein. Einerseits müssen die Daten zu Straßen, Flurstücken und Umrissen sowie Wärmebedarfen der Gebäude verfügbar sein. Andererseits müssen die Gebäude im

Untersuchungsgebiet die technischen Voraussetzungen für einen Fernwärmeanschluss erfüllen. Auch wenn die genannten Bedingungen erfüllt sind, können geografische Besonderheiten auftreten, die zu unrealistischen Trassenverläufen führen. Beispielsweise berücksichtigt das Modell keine Hindernisse wie Gewässer, die bei Durch-/Überquerung zu höheren Kosten führen (Schmidt & Stange, 2021, S. 99–100).

Da alle genannten Bedingungen für Hamburg erfüllt sind, wird davon ausgegangen, dass das Modell innerhalb von Hamburg anwendbar ist. Auf der Ebenen von anderen Städten in Deutschland, Europa und international ist das Modell nur nutzbar, sofern die nötigen Daten (Straßen, Flurstücke, Wärmekataster) in entsprechender Qualität vorhanden sind. Nicht in allen Fällen gibt es ein Wärmekataster (Dochev et al., 2020), was zudem öffentlich ist. Folglich kann keine Wärmelinien-dichte berechnet werden, eine reine Trassenverlaufsplanung wäre trotzdem möglich, indem stattdessen Gebäudepolygone verwendet werden. Zudem ist zu beachten, dass nicht in allen europäischen Ländern die Häuser aus technischer Sicht für einen Wärmenetzanschluss geeignet sind. Beispielsweise ist es in Italien gewöhnlich, dass nicht alle Gebäude eine Zentralheizung haben (Dénarié et al., 2021, S. 64). Wie sich die siedlungsstrukturellen Merkmale verschiedener Städte auf die Ergebnisqualität auswirken, bleibt zu untersuchen.

Zusammenfassend gesagt, kann das Modell auch für andere Gebiete innerhalb Hamburgs angewendet werden, sofern die benötigten Geodaten zur Verfügung stehen. Die Anwendung in anderen deutschen und europäischen Städten ist durch die Datenverfügbarkeit beschränkt.

6 Schluss

Im Fazit wird eine Bewertung der vorliegenden Arbeit auf der Metaebene vorgenommen. Der Ausblick zeigt weitere Forschungsbedarfe auf und beleuchtet den Nutzen der Arbeit im größeren Kontext.

6.1 Fazit

Die Hypothese A lautet: „Innerhalb von QGIS lässt sich eine vereinfachte Planung des Trassenverlaufes für den Ausbau von Wärmenetzen automatisieren“. Diese Hypothese wurde bestätigt für Gebiete mit maximal 0,24 km² Fläche. Die Hypothese B „Bei der automatisierten Ermittlung des Trassenverlaufes können die Praxiskriterien von Seite 9 berücksichtigt werden“ wurde ebenfalls bestätigt.

Es wurde herausgefunden: Die Praxiskriterien zur Trassenplanung decken sich nicht mit den Kriterien der wissenschaftlichen Publikationen. Ein Grund könnte darin liegen, dass es dem einen Wärmeversorger im ersten Schritt um den geografischen Planungsprozess geht, welcher Teil der Planungsphase ‚Vorstudie‘ nach Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al. (2021, S. 105–109) ist. In den Publikationen geht es hingegen um eine möglichst genaue Berechnung des Netzes für eine genaue Kostenberechnung und eine detaillierte Auslegung des Netzes im Sinne des Leitungsbaus. Das ist nach Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al. (2021, S. 111–114) Teil der späteren Planungsphasen ‚Entwurfsplanung‘ sowie ‚Planung, Ausschreibung und Vergabe‘. Zwar finden die Kriterien der Wissenschaft Anwendung in der Praxis (bspw. Nussbaumer, Thalmann, Jenni, et al., 2021, S. 111–114), umgekehrt ist dies jedoch nicht der Fall. Es bleibt zu untersuchen, wodurch die Diskrepanz entsteht. Sowohl für die Auslegung als auch für die Kostenberechnung der wissenschaftlichen Modelle sind räumliche, planungspraktische Kriterien relevant, da sie in diesen späteren Planungsphasen genauso bestehen bleiben und den Trassenverlauf beeinflussen, wie in den frühen Planungsphasen. Daher sind die Praxiskriterien im Fokus dieser Arbeit. Folglich stützt sie sich auf Praxiswissen, was die Anwendbarkeit des Modells für Wärmenetzbetreibende, vor allem in Hamburg, erhöht.

Die zentrale wissenschaftliche Leistung der Arbeit ist, zu zeigen, dass im begrenzten Rahmen einer Bachelorarbeit die Implementierung von drei der acht Praxiskriterien umgesetzt werden konnten: Die Erstellung der Anschlusspunkte auf Flurstückebene, ein einstellbarer Mindestwärmewert zur Fokussierung mit hohem Wärmebedarf und ein einstellbarer Erschließungsgrad wurden implementiert, da dies im begrenzten Rahmen der Arbeit zeiteffizient möglich war. Weitere Kriterien wurden festgestellt, aber nicht umgesetzt, da deren Implementierung nach einer ersten

Einschätzung zu viel Zeit benötigt hätte. Inwieweit die drei genannten Praxiskriterien eine reale Trassenplanung annähern, wurde aufgrund fehlender Daten nicht untersucht.

Die weiteren Ziele neben der Implementierung der Praxiskriterien wurden größtenteils erreicht (siehe Seite 43), abgesehen von der automatischen Berechnung der Wärmelinien-dichte und der Untersuchung von größeren Gebieten. Auf dem Weg zur Erreichung der Ziele und dem Untersuchen der Hypothesen haben sich die folgenden zentralen Erkenntnisse herauskristallisiert:

- Das erstellte Modell erzeugt einen Trassenverlauf, der an vielen Stellen ähnlich ist zu den Trassenverläufen anderer Wärmenetzplanungsmodelle (CEA, Thermos), abgesehen vom Ort der Anschlusspunkte.
- Das Modell kann für die erste Abschätzung einer realen Trassenplanung verwendet werden, nicht aber als Entwurf, weil das Modell zu wenige planungspraktische Kriterien berücksichtigt, um eine ausreichende Annäherung an die Praxis zu leisten.
- Die Länge des mit dem Modell erstellten Netzes ist deutlich kürzer als die Länge der Vergleichsnetze, was an der Erstellung der Anschlusspunkte je Flurstück liegt.
- Die Erstellung der Anschlusspunkte je Flurstück, anstatt je Gebäude, trat im Untersuchungsgebiet nur bei 16 % der Flurstücke auf. Die beiden größten Flurstücke des Untersuchungsgebietes haben den Trassenverlauf jedoch erheblich beeinflusst, indem je 1 Anschlusspunkt erstellt wurde anstatt 89 beziehungsweise 15 Anschlusspunkte.
- Die Berechnung der Wärmelinien-dichte ist mit dem Modell möglich, wurde aber noch nicht automatisiert.
- Die mit dem Modell berechnete Wärmelinien-dichte liefert keine absolute, sondern eine relative Bewertung der Wärmenetztauglichkeit eines Gebietes.
- Das Modell kann innerhalb von Hamburg angewendet werden. Für andere Regionen müssen die entsprechenden Daten in entsprechender Qualität vorliegen. Zudem muss das Gebiet in Flurstücke oder flurstückähnliche Zonen unterteilt sein.

6.2 Ausblick

Anknüpfend an die zentralen Erkenntnisse werden hier die Implikationen der Arbeit für Wissenschaft und Praxis aufgezeigt.

Nun besteht der Bedarf, die Praxiskriterien dieser Arbeit in bestehende Modelle mit thermisch-hydraulischem Fokus zu implementieren, um deren Ergebnisse der Realität anzunähern. Darüber hinaus könnte das hier vorgestellte Modell weiterentwickelt werden. Zum Testen des Modells wäre

ein Vergleich mit realen Netzdaten sinnvoll (zu beachten ist, dass laut eines Wärmeversorgers ein bestehendes Netz in Hamburg gewachsen sei und daher eine andere Struktur habe als ein Netz, das von Grund auf neu geplant wird). Zudem wäre die Anwendbarkeit des Modells in anderen Städten zu untersuchen. Bestehende Modellkriterien können verbessert werden, indem beim Erschließungsgrad berücksichtigt wird, dass Gebäude sich mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit anschließen lassen. Auch kann der Ort der Anschlusspunkte optimiert werden, indem anhand von realen Netzen der Zusammenhang von Flurstücken und einem gemeinsamen Anschlusspunkt untersucht wird. Zur Verbesserung der Anschlusspunkterstellung könnte auch untersucht, ob anhand von Schornsteinen auf Satellitenbildern Anschlusspunkte automatisiert und präzise erstellt werden können. Daneben könnte die Versorgungssicherheit des erstellten Netzes verbessert werden, indem automatisch Ring-/Maschennetze erzeugt werden können oder indem die Länge der einzelnen Äste beim Sternnetz gering gehalten wird. Neu zu implementierende Aspekte sind die bisher nicht umgesetzten Praxiskriterien von Seite 9. Zudem wird ein großer Mehrwert erwartet, wenn das Modell automatisch mehrmals mit dem gleichen Erschließungsgrad ausgeführt wird und daraus die Robustheit der Netzlänge und die Wichtigkeit der Rohrabschnitte ermittelt werden können.

Darüber hinaus wird der Bedarf gesehen, weitere Literaturrecherche zu den Stichworten Gebietsentwicklung, multikriterielle (Fern-)Wärmeplanung und multikriterielle Trassenoptimierung von Wärmenetzen durchzuführen, um weitere Hinweise zu planungspraktischen Kriterien zu sammeln und zu schauen, ob oder wie diese bereits in digitalen Planungswerkzeugen umgesetzt wurden.

Nicht unerwähnt bleiben sollen erwartete gesellschaftliche Auswirkungen dieser Arbeit. Dass das Modell nur einen Teil der Planung abbildet, könnte Konfliktpotenzial beinhalten, vor allem bei der Fokussierung auf Gebäude mit hohem Wärmebedarf. Daher müssen die Ergebnisse immer im Rahmend der aufgezeigten Limitationen des Modells betrachtet werden. Unter Berücksichtigung der aufgezeigten Limitationen können die Weitergabe und Weiterentwicklung des Modells zur Verbesserung von Wärmeplanungswerkzeugen beitragen durch die Implementierung von Praxiskriterien. Die einfache und schnelle Anwendung des Werkzeugs kann vor allem für QGIS-Nutzende ohne Programmierkenntnisse vorteilhaft sein. Damit kann die vorliegende Arbeit zur Beschleunigung der Wärmeplanung und damit zur Umsetzung der Energiewende beitragen.

Hilfsmittel und Quellenverzeichnis

genutzte Hilfsmittel

Dieser Arbeit enthält Ergebnisse der Software Thermos (<https://www.thermos-project.eu>). Für weitere Informationen zu Thermos kontaktieren sie das Zentrum für Erneuerbare Energien (Centre for Sustainable Energy <https://www.cse.org.uk>).

In der vorliegenden Arbeit wurden zudem folgende Werkzeuge verwendet, die auf künstlicher Intelligenz basieren:

- ChatGPT (3.5). (2024). [Large Language Modell]. OpenAI. <https://chat.openai.com/chat>
 - Nutzungsart: ChatGPT wurde bei Fragen zur Erstellung des Modellcodes herangezogen, beispielsweise zur Frage, mit welchem QGIS-Werkzeug Gebäude pro Flurstück aggregiert werden können.
 - betroffene Teile der Arbeit: erstelltes QGIS-Modell
- ChatGPT (3.5). (2024). [Large Language Modell]. OpenAI. <https://chat.openai.com/chat>
 - Nutzungsart: ChatGPT wurde zur Erstellung von Suchtermen für die Literaturrecherche zur Ausbaubewertung von Wärmenetzen verwendet. Der Suchterm wurde anhand von einer eingegebenen Themenbeschreibungen (beispielsweise „Wie werden Gebiete bewertet (die an bestehende Wärmenetze angrenzen), ob sie für den Ausbau des Fernwärmenetzes geeignet sind?“) erstellt.
 - betroffene Teile der Arbeit: alle Kapitel der vorliegenden schriftlichen Arbeit
- ChatGPT (3.5). (2024). [Large Language Modell]. OpenAI. <https://chat.openai.com/chat>
 - Nutzungsart: ChatGPT wurde zur Neuformulierung einzelner, bereits geschriebener Sätze verwendet.
 - betroffene Teile der Arbeit: alle Kapitel der vorliegenden schriftlichen Arbeit
- DeepL Übersetzer. (o. J.). [Online Übersetzung mit KI]. DeepL SE. Genutzt am 23. Juli 2024, von <https://www.deepl.com/translator>
 - Nutzungsart: DeepL wurde genutzt zur Übersetzung des Kapitels **Zusammenfassung**, um eine erste Version des Kapitels **Summary** zu erstellen. Anschließend wurden Wörter korrigiert (beispielsweise wurde „heat line density“ ersetzt durch „linear heat density“).
 - betroffene Teile der Arbeit: Kapitel **Summary**

Quellenverzeichnis

- Aaron Wieland. (2023). *Consideration of District Heating Subnetwork Structures In Areas With Low Heat Demand Density*.
- Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke (Hrsg.). (2022). *Planungshandbuch* (3., komplett überarbeitete Auflage). C.A.R.M.E.N. e.V.
https://www.qmholzheizwerke.ch/fileadmin/sites/qm/files/00_3_Publikationen/QMH_Planungshandbuch_2022_3.Auflage.pdf
- Behörde für Umwelt und Energie Hamburg. (2019). *Wärmekataster Handbuch*. Behörde für Umwelt und Energie Hamburg.
<https://www.hamburg.de/contentblob/8679336/abfc99dc53a6f145a9daa7c93a259ce4/data/d-handbuch.pdf>
- Blazek, R. (o. J.). *V.net.steiner* (Version grass7) [Software]. Abgerufen 13. Juni 2024, von <https://grass.osgeo.org/grass83/manuals/v.net.steiner.html>
- BUKEA Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft. Amt für Energie und Klima. Abteilung Energierecht und städtische Energiepolitik. (o. J.). *Wärmekataster Hamburg*. hamburg.de. Abgerufen 11. Juni 2024, von <https://www.hamburg.de/energiewende/waermekataster/>
- Bundala, D. (o. J.). *V.net.spanningtree* (Version grass7) [Software]. Abgerufen 13. Juni 2024, von <https://grass.osgeo.org/grass83/manuals/v.net.spanningtree.html>
- Bungartz, H.-J., Buchholz, M., Pflüger, D., & Zimmer, S. (Hrsg.). (2009). *Modellbildung und Simulation Eine anwendungsorientierte Einführung*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-79810-1>
- Çalışkan, M., & Anbaroğlu, B. (2020). Geo-MST: A geographical minimum spanning tree plugin for QGIS. *SoftwareX*, 12, 100553. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100553>
- Clausen, J., Graf, C., Huber, M., Lottis, D., Seifert, T., & Weber, U. (2022, Dezember 7). *Wärmenetze—Die klimaneutrale Wärmeversorgung für verdichtete Stadtgebiete*. Policy Paper der Scientist for Future. <https://info-de.scientists4future.org/waermenetze/>
- Dénarié, A., Macchi, S., Fattori, F., Spirito, G., Motta, M., & Persson, U. (2021). A validated method to assess the network length and the heat distribution costs of potential district heating systems in Italy. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 31, 59–78. <https://doi.org/10.5278/ijsepm.6322>
- Der Begriff der Fernwärme*. (o. J.). AGFW. Abgerufen 7. Juli 2024, von <https://www.agfw.de/energiewirtschaft-recht-politik/recht/avbfernwaermev/der-begriff-der-fernwaerme>
- Dochev, I. (2017). *Significance of the accuracy of building heat demand estimations for the planning of heating grids* [Thesis, HafenCity Universität Hamburg]. <https://repos.hcu-hamburg.de/handle/hcu/128>
- Dochev, I. (2021). *Ivandochev/hypothetical-heating-grids* [Python]. https://github.com/ivandochev/hypothetical-heating-grids/blob/master/Hypothetical%20Heating%20Grids_District_Heating_Conference_FIN.py (Original work published 2018)
- Dochev, I., Muñoz Hidalgo, M. E., Seller, H., & Peters, I. (2018). *Assigning energetic archetypes to a digital cadastre and mand. An example from Hamburg, Germany* [Working Paper].

HafenCity University, Technical Infrastructure Systems Group.
<https://www.hamburg.de/resource/blob/157942/b6d0e77620d896eb36f37fb7f56802ad/d-assigning-energetic-archetypes-data.pdf>

- Dochev, I., Peters, I., Seller, H., & Schuchardt, G. K. (2018). Analysing district heating potential with linear heat density. A case study from Hamburg. *Energy Procedia*, 149, 410–419. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.205>
- Dochev, I., Seller, H., & Peters, I. (2020). Assigning Energetic Archetypes to a Digital Cadastre and Estimating Building Heat Demand. An Example from Hamburg, Germany. *Environmental and Climate Technologies*, 24(1), 233–253. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0014>
- Doetsch, C., Taschenberger, J., & Schönberg, I. (1998). *Leitfaden Nahwärme*. Fraunhofer IRB Verlag. <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/289657>
- Energieverbrauch für fossile und erneuerbare Wärme*. (2024, Februar 4). [Text]. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-fuer-fossile-erneuerbare-waerme>
- Engelmann, P., Köhler, B., Meyer, R., Dengler, J., Herkel, S., Kießling, L., Quast, A., Berneiser, J., Bär, C., Sterchele, P. 1989-, Heilig, J., Bürger, V., Braungardt, S., Hesse, T., Sandrock, M., Maaß, C., Strodel, N., & Steinbrenner, J. (2021). *Systemische Herausforderung der Wärmewende Abschlussbericht* (37EV 17 105 0; Climate Change). Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/systemische-herausforderung-der-waermewende>
- Erdmann, S., Belkot, T., Friebe, F., Gravenhorst, T., & Koch, S. (2021). GIS-Analysen für eine kleinräumige multikriterielle Wärmeleitplanung. *AGIT–Journal für Angewandte Geoinformatik*, 7, 228–238.
- Esch, T., Taubenböck, H., Geiß, C., Schillings, C., Nast, M., Metz, A., Heldens, W., & Keil, M. (2011, Februar 18). *Potenzialanalyse zum Aufbau von Wärmenetzen unter Auswertung siedlungsstruktureller Merkmale*. <https://elib.dlr.de/76816/>
- Fischedick, M., Schüwer, D., Venjakob, J., Merten, F., Mitze, D., Nast, M., Schillings, C., Krewitt, W., Bohnenschäfer, W., & Lindner, K. (2007). *Potenziale von Nah- und Fernwärmenetzen für den Klimaschutz bis zum Jahr 2020: Bd. 2007,17* (17/07; Climate Change, S. 221). Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/potenziale-von-nah-fernwaermenetzen-fuer-den>
- Fonseca, J., Thomas, D., Mok, R., Hsieh, S., Sreepathi, B. K., Happle, G., Rogenhofer, L., Niffeler, M., Shi, Z., Romero, M. M., Jack-Hawthorne, Khayatian, F., Riegelbauer, E., Iguilhermers, Ong, B. L., orenkiwi, jarunan, MeshkinKiya, M., Sulzer, M., ... Badger, T. G. (2024). *architecture-building-systems/CityEnergyAnalyst: CityEnergyAnalyst v.3.35.5* (Version v3.35.5) [Python]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10847779>
- Freie und Hansestadt Hamburg Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft. (2018). *Wärmekataster Wärmebedarf Hamburg—MetaVer* [Geodaten; Lizenz dl-de/by-2-0 siehe www.govdata.de/dl-de/by-2-0]. <https://metaver.de/>. <https://metaver.de/trefferanzeige?docuuid=490217DC-8899-4D70-80A2-E0C1EBDAC8DE>
- Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft. (2019). *Wärmekataster Hamburg – Hypothetisches Wärmenetz—MetaVer* [Geodaten; Lizenz dl-de/by-2-0 siehe www.govdata.de/dl-de/by-2-0]. <https://metaver.de/>. <https://metaver.de/trefferanzeige?docuuid=D72E73FB-97A0-45DD-BE51-DE9C4EB5C4C2>

- Freie und Hansestadt Hamburg Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft. (2023). *Wärmenetzzeichnungsgebiete Hamburg—MetaVer* [Geodaten; Lizenz dl-de/by-2-0 siehe www.govdata.de/dl-de/by-2-0]. <https://metaver.de/>. <https://metaver.de/trefferanzeige?docuuid=E0760C38-63F7-4175-86F7-92F73CAF1BCA>
- Freie und Hansestadt Hamburg Behörde für Verkehr und Mobilitätswende, (BVM). (2022). *Straßen- und Wegenetz Hamburg (HH-SIB)—MetaVer* (Geodaten <https://registry.gdi-de.org/id/de.hh/5262159C-D358-11D5-88C8-000102DCCF41>) [Lizenz dl-de/by-2-0 siehe www.govdata.de/dl-de/by-2-0]. <https://metaver.de/>. <https://www.metaver.de/trefferanzeige?docuuid=5262159C-D358-11D5-88C8-000102DCCF41>
- Freie und Hansestadt Hamburg, Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (LGV). (2020a). *Digitales Höhenmodell Hamburg DGM 10—MetaVer* [Geodaten; Lizenz dl-de/by-2-0 siehe www.govdata.de/dl-de/by-2-0]. <https://metaver.de/>. https://metaver.de/trefferanzeige?docuuid=D42A83D3-8D1A-45F9-9FD3-BEB8C51E091D&q=DGM+in+UTM+Hamburg#detail_links
- Freie und Hansestadt Hamburg, Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (LGV). (2020b). *INSPIRE HH Flurstücke/Grundstücke ALKIS - MetaVer* [Geodaten; Lizenz dl-de/by-2-0 siehe www.govdata.de/dl-de/by-2-0]. <https://metaver.de/>. https://metaver.de/trefferanzeige?docuuid=9F0CF4ED-A570-4856-B0EC-BBAD5A2E3D0C&q=HH+inspire+flurstuecke&f=type%3Ainspire%3Bprovider%3Ahh%3B#detail_links
- Fuchs, M., & Müller, D. (2018). Automated Design and Model Generation for a District Heating Network from OpenStreetMap Data. *Proceedings of the 15th IBPSA Conference*, 2050–2059. https://publications.ibpsa.org/proceedings/bs/2017/papers/BS2017_562.pdf
- Fuchs, M., Teichmann, J., Lauster, M., Remmen, P., Streblow, R., & Müller, D. (2016). Workflow automation for combined modeling of buildings and district energy systems. *Energy*, 117, 478–484. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.023>
- Geiß, C., Taubenböck, H., Wurm, M., Esch, T., Nast, M., Schillings, C., & Blaschke, T. (2011). Remote Sensing-Based Characterization of Settlement Structures for Assessing Local Potential of District Heat. *Remote Sensing*, 3(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/rs3071447>
- Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) am Umweltbundesamt. (2024, März 7). *Erneuerbare Energien in Deutschland 2023*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erneuerbare-energien-in-deutschland-2023>
- Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze (Wärmeplanungsgesetz - WPG) (2024). <https://www.gesetze-im-internet.de/wpg/WPG.pdf>
- Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden* (Gebäudeenergiegesetz - GEG) (2024). <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/GEG.pdf>
- Good, J., Thalmann, S., Nussbaumer, T., Keel, A., Küttel, P., Schrammel, H., Metz, S., Ramerstorfer, C., Binder, J., Krapf, G., Alter, N., Letalik, C., Thorwarth, H., Eichermüller, J., & Jenni, A. (2022). *Planungshandbuch QM Holzheizwerke* (3. Auflage).
- Haklay, M., & Weber, P. (2008). OpenStreetMap: User-Generated Street Maps. *IEEE Pervasive Computing*, 7(4), 12–18. *IEEE Pervasive Computing*. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2008.80>

- Hamburgisches Gesetz zum Schutz des Klimas, 754–1 HmbGVBl. 2020, 148 (2020).
https://www.landesrecht-hamburg.de/jportal/recherche3doc/KlimaSchG_HA_2020.pdf?json=%7B%22format%22%3A%22pdf%22%2C%22params%22%3A%7B%22fixedPart%22%3A%22true%22%7D%2C%22docPart%22%3A%22X%22%2C%22docId%22%3A%22jlr-KlimaSchGHA2020pG%22%2C%22portalId%22%3A%22bsha%22%7D&_=%2FKlimaSchG_HA_2020.pdf
- Hansen, C. H., & Gudmundsson, O. (2018). *The Competitiveness of District Heating Compared to Individual Heating*. <https://danskfjernvarme.dk/media/zulfbv0j/the-competitiveness-of-district-heating-compared-to-individual-heating.pdf>
- Höffner, D. (2022). *Entwicklung einer integrierten Methode zur Planung und Simulation wärmenetzbasierter, urbaner Energiesysteme im Kontext von Energiewende und Sektorenkopplung* [Masterarbeit, RWTH Aachen]. <https://doi.org/10.24406/publica-498>
- Integrated tool for empowering public authorities in the development of sustainable plans for low carbon heating and cooling*. (o. J.). CORDIS | European Commission. Abgerufen 27. März 2024, von <https://cordis.europa.eu/project/id/723757/reporting>
- Jalil-Vega, F., & Hawkes, A. D. (2018). The effect of spatial resolution on outcomes from energy systems modelling of heat decarbonisation. *Energy*, 155, 339–350.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.160>
- Jebamalai, J. M., Marlein, K., Laverge, J., Vandeveld, L., & van den Broek, M. (2019). An automated gis-based planning and design tool for district heating: Scenarios for a dutch city. *Energy*, 183, 487–496. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.111>
- Kuriyan, K., & Shah, N. (2019). A combined spatial and technological model for the planning of district energy systems. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 21, 111–131. <https://doi.org/10.5278/ijsepm.2019.21.8>
- Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (LGV) Hamburg. (2020). *INSPIRE HH Gebäude ALKIS - MetaVer* [Geodaten; Lizenz dl-de/by-2-0 siehe www.govdata.de/dl-de/by-2-0]. <https://metaver.de>. <https://metaver.de/trefferanzeige?docuuid=0C4AD3A9-ECC4-4936-92FD-18E21DFA9234>
- Lange, N. (2013). *Geoinformatik in Theorie und Praxis* (3., vollst. überarb. u. akt. Aufl. 2013). Springer Spektrum.
<https://external.dandelon.com/download/attachments/dandelon/ids/DE00405B34AAE3B5A35D9C1257B9B002C363C.pdf>
- Lumbreras, M., Diarce, G., Martin-Escudero, K., Campos-Celador, A., & Larrinaga, P. (2022). Design of district heating networks in built environments using GIS: A case study in Vitoria-Gasteiz, Spain. *Journal of Cleaner Production*, 349, 131491.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131491>
- Maaß, C. (2021). Wärmeplanung: Grundlagen einer neuen Fachplanung. *Zeitschrift für Umweltrecht*, 1/2020, 22–31. <https://doi.org/10.5771/9783748924241-77>
- Mehr Tempo bei der Transformation der Wärmeversorgung Wärmenetze klimaneutral um- und ausbauen*. (2023, Juni 12). Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0612-erklaerung-fernwaemegipfel.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- Muenchow, J., Schäfer, S., & Krüger, E. (2019). Reviewing qualitative GIS research—Toward a wider usage of open-source GIS and reproducible research practices. *Geography Compass*, 13(6), e12441. <https://doi.org/10.1111/gec3.12441>

- Nageler, P., Schweiger, G., Mach, T., Heimrath, R., Schranzhofer, H., Fochler, L. M., Hochenauer, C., Leusbrock, I., Fluch, J., & Fink, C. (2019). Co-simulation workflow for the dynamic modelling and simulation of large-scale district energy systems. *Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA*, 16, 3698–3705. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.211048>
- Nussbaumer, T., Thalmann, S., & Jenni, A. (2021). *Leitfaden zur Planung von Fernwärme-Übergabestationen: Bd. Version 1.1*. https://www.verenum.ch/Dokumente/Leitfaden_FW_UGST_V1.1.pdf
- Nussbaumer, T., Thalmann, S., Jenni, A., & Ködel, J. (2021). *Planungshandbuch Fernwärme* (Arbeitsgemeinschaft QM Fernwärme, Hrsg.; Version 1.2). EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE.
- Oemof/DHNx. (2024). [Python]. oemof community. <https://github.com/oemof/DHNx> (Original work published 2019)
- OpenStreetMap. (o. J.). [Lizenz „Open Data Commons Open Database-Lizenz“ siehe <https://www.openstreetmap.org/copyright>]. Abgerufen 9. Mai 2024, von <https://www.openstreetmap.org/>
- Ortner, S., Acker, Y., Pehnt, M., Hering, D., Wachter, P., Johannsen, L., Paar, A., Keimeyer, F., Braungardt, S., Bürger, V., Köhler, B., Radgen, P., Ott, B., Kluge, C., Bartsch, A., Langreder, N., & Billerbeck, A. (2024). *Leitfaden Wärmeplanung—Empfehlungen zur methodischen Vorgehensweise für Kommunen und andere Planungsverantwortliche*. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB). https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/downloads/Webs/BMWSB/DE/veroeffentlichungen/wohnen/leitfaden-waermeplanung-lang.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Peronato, G., & Kämpf, J. H. (2022). *DHgeN* [Python]. Idiap Research Institute. <https://github.com/idiap/dhgen> (Original work published 2022)
- Pfeiffer, J. (2024). *DistrictHeatSim* [Python]. <https://github.com/JonasPfeiffer123/DistrictHeatSim> (Original work published 2023)
- Planheat-Tool. (2021). [Python]. <https://github.com/Planheat/Planheat-Tool> (Original work published 2019)
- Purr, K., Günther, J., Lehmann, H., & Nuss, P. (2019). *Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE: Langfassung* (36/2019; Climate Change). Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/rescue>
- Rehfeldt, D. M. (2021). *Faster algorithms for Steiner tree and related problems: From theory to practice* [Technische Universität Berlin]. <https://depositonce.tu-berlin.de/handle/11303/13694>
- Reinhart, C. F., & Cerezo Davila, C. (2016). Urban building energy modeling – A review of a nascent field. *Building and Environment*, 97, 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001>
- Releases. (2024, Januar 12). <https://oemof.org/category/releases/>
- Röder, J., Meyer, B., Krien, U., Zimmermann, J., Stührmann, T., & Zondervan, E. (2021). Optimal Design of District Heating Networks with Distributed Thermal Energy Storages – Method and Case Study. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 31, 5–22. <https://doi.org/10.5278/ijsepm.6248>

- Salenbien, R., Wack, Y., Baelmans, M., & Blommaert, M. (2023). Geographically informed automated non-linear topology optimization of district heating networks. *Energy*, 283, 128898. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128898>
- Sandberg, B. (2016). *Wissenschaftliches Arbeiten von Abbildung bis Zitat: Lehr- und Übungsbuch für Bachelor, Master und Promotion*. De Gruyter Oldenbourg. <https://doi.org/10.1515/9783110514810>
- Schmidt, J., & Stange, P. (2021). Optimization of district heating network design. *Energy Reports*, 7, 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.09.034>
- Sonvilla, P. M., Lopez, J. V., & Torres, A. D. (2021, Mai 31). *Thermal Energy Resource Modelling and Optimization System—Replication Guide*. https://www.thermos-project.eu/fileadmin/user_upload/210331_THS_WP5_D5.15_CREAR_A_Replication_Guide_FINAL.pdf
- Statistisches Bundesamt. (o. J.). *Einwohnerzahl der 15 größten Städte Deutschlands*. Statistisches Bundesamt. Abgerufen 22. Juli 2024, von <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/bar-chart-race.html>
- THERMOS (Version 8). (2021). [Software]. <https://www.thermos-project.eu/home/>
- Tobias, L., Britta, S., Nikolaus, D., & Rolf, B. (2015). *Deutsche Wohngebäudetypologie Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden* (Bd. 2). https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/episcopo/2015_IWU_LogeEtAl_Deutsche-Wohngeb%C3%A4udetypologie.pdf
- Tool Access. (2021, April 22). THERMOS. <https://www.thermos-project.eu/thermos-tool/tool-access/>
- Topp, A. (2009). Der Begriff der Fernwärme. *Recht der Energiewirtschaft, Sonderdruck*, 133–138.
- Verein Deutscher Ingenieure. (2014). *VDI 3807 Blatt 2 Verbrauchskennwerte für Gebäude—Verbrauchskennwerte für Heizenergie, Strom und Wasser*. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3807-blatt-2-verbrauchskennwerte-fuer-gebaeude-verbrauchskennwerte-fuer-heizenergie-strom-und-wasser-1>
- von Wehrden, H., & Chauhan, N. (2024, Februar 7). *Geographical Information Systems—Sustainability Methods*. https://sustainabilitymethods.org/index.php/Geographical_Information_Systems
- Wack, Y., Baelmans, M., Salenbien, R., & Blommaert, M. (2023). Economic topology optimization of District Heating Networks using a pipe penalization approach. *Energy*, 264, 126161.
- Welcome to DHNx's documentation! —DHNx 0.0.4dev0 documentation. (o. J.). Abgerufen 26. Juli 2024, von <https://dhn.readthedocs.io/en/latest/>
- Wiese, F., Hilpert, S., Kaldemeyer, C., & Pleßmann, G. (2018). A qualitative evaluation approach for energy system modelling frameworks. *Energy, Sustainability and Society*, 8(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s13705-018-0154-3>

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die ich wortwörtlich oder sinngemäß aus fremden Werken entnommen habe, habe ich als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit habe ich in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt.

Lüneburg, den 9.8.2024

Justus Degenhardt