



# Master-Thesis

**Erstellung eines Tools zur systematischen Aufbereitung von Daten für  
Wärmeplanungen**

Matthias Markus Werle  
1916158

Elektrotechnik  
Renewable Energy

Wuppertal, den 08. Mai 2023

Betreuer Marlon Koralewicz

Erstgutachter Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek  
Zweitgutachter Univ.-Prof. Dr.-Ing. Benedikt Schmülling





Lehrstuhl für  
Elektrische Energieversorgungstechnik

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek

Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik  
und Medientechnik

Campus Freudenberg  
Rainer-Gruenter-Straße  
42119 Wuppertal

## Thema für die Master-Thesis

Kandidat\*in: Matthias Werle

Matrikel-Nr.: 1916158

Studiengang: Elektrotechnik

Fachliche\*r Ansprechpartner\*in: Marlon Koralewicz und Joshua Jakob

Thema: Erstellung eines Tools zur systematischen Aufbereitung von Daten für Wärmeplanungen

### Aufgabenstellung:

Im Rahmen der Energiewende mit dem Ziel der Dekarbonisierung des Energiesystems rückt die Wärmewende in den Fokus der politischen Agenden. Die wichtigsten technischen Maßnahmen der Wärmewende sind zum einen die Energieverbrauchssenkung und zum anderen die Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien (EE) in der Wärmeversorgung. Der EE-Anteil kann durch EE-Strom und EE-Gase sowie durch den Wechsel der Wärmeerzeugungstechnologie erhöht werden. Grundlage für Wärmeplanungen zur Umsetzung der Wärmewende ist die Aufbereitung einer umfassenden Datenbasis bzgl. Wärmeverbrauch, Gebäudestruktur und Wärmeerzeugung.

In dieser Master-Thesis soll ein Tool erarbeitet werden, mit dem für Wärmeplanungen relevante und öffentlich zugängliche Daten aufbereitet werden. Dazu soll zuerst eine Recherche zu den Parametern der Wärmeversorgung (Gebäude-, Einwohnung und EE-Daten) erfolgen. Zudem sollen die politischen Ziele und Potenziale der Gebäudesanierung in Deutschland recherchiert werden. Danach sollen öffentlich verfügbare Daten (u.a. OSM, geofabrik, Zensus, Energiebehörden) gesichtet und auf Basis der Recherchen gemäß ihrer Eignung zur Planung ausgewählt werden. Zur Nutzung der ausgewählten Datenpakete soll ein python-Tool entwickelt werden, dass den automatisierten Import, die Aufbereitung sowie den Transfer nach QGis ermöglicht. Die Daten sollen bereinigt und Datenlücken automatisch erkannt, kenntlich gemacht und mit Ersatzwerten gefüllt werden. Abschließend soll das Tool exemplarisch auf eine Region angewendet werden.

Zusammenfassend beinhaltet die Master-Thesis somit folgende, wesentlichen Teilaufgaben:

- Recherche zu Parametern der Gebäudewärmeversorgung, Einwohnerdaten, EE-Daten
- Analyse der Sanierungsentwicklung und des -potenzials in Deutschland
- Sichtung von öffentlich verfügbaren Daten und Analyse der Eignung bzgl. der Parameter
- Auswahl der zu nutzenden Daten für deutschlandweite Analysen mit Fokus auf NRW
- Entwicklung des python-Tools zum automatisierten Datenimport, -aufbereitung und QGis-Export
- Anwendung des entwickelten Tools auf eine Beispielregion

Wuppertal, den 7. November 2022

Unterschrift Erstgutachter\*in

Erstgutachter\*in: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zdrallek

Zweitgutachter\*in: Univ.-Prof. Dr.-Ing. B. Schmülling



BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL

---

**Prüfungsamt**

Kennziffer: 221THMET24Z05  
Ausgabedatum: 7.11.2022  
Abgabedatum: 8.5.2023

---

Unterschrift Prüfungsamt

---

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst, ChatGPT<sup>1</sup> lediglich sowohl als Ideen bzw. Rat gebende KI als auch als Einschätzungstool und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Wuppertal, den 08. Mai 2023

---

(Unterschrift)

## Einverständniserklärung

Ich bin damit einverstanden, dass meine Arbeit unter einer Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-NC-SA 4.0) lizenziert veröffentlicht wird. Unter Einhaltung der Lizenzgebühren, kann die- se Arbeit unter gleichen Bedingungen geteilt und verändert werden. Die Arbeit darf somit elektronisch gespeichert, in andere Formate konvertiert, auf den Servern der Bergischen Universität Wuppertal öffentlich zugänglich gemacht und über das Internet ver- breitet werden. Ausgeschlossen hiervon sind Korrektur- und Bewertungshinweise in meiner Arbeit. Korrektur- und Bewertungshinweise in meiner Arbeit dürfen nicht zitiert werden.

Wuppertal, den 08. Mai 2023

---

(Unterschrift)



---

<sup>1</sup>Chatbot von OpenAI, verschiedene Versionen



---

# Kurzfassung

Die Wärmewende mit den Ziel der Dekarbonisierung des Wärmesektors ist integraler Bestandteil der Energiewende zur Erreichung klimaneutraler Energiesysteme. Die Dekarbonisierung des Wärmesektors kann zum Einen durch die Senkung des Wärmeverbrauchs und zum Anderen durch die Steigerung des Anteils Erneuerbarer Energien bei der Wärmeerzeugung erreicht werden. Zur Umsetzung beider Optionen bietet sich eine Vielzahl technischer Maßnahmen an. Welche Maßnahmen sich je nach lokalen Begebenheiten am besten eignen, lässt sich durch Wärmeplanungen bestimmen. Mittels einer Bestandsaufnahme, Potentialanalysen und Aufstellungen von Zielszenarien wird eine lokale Wärmewendestrategie zur Erreichung der gesetzten Ziele entwickelt. Hierfür bedarf es einer umfassenden Datengrundlage u.a. bezüglich der Gebäudestruktur, des Wärmeverbrauchs und der Wärmeerzeugung.

Ziel dieser Thesis ist die Sichtung öffentlich verfügbarer Daten, Auswahl geeigneter Daten für Wärmeplanungen und die Erstellung eines Python-Tools zur systematischen Aufbereitung der ausgewählten Daten für den Export nach QGIS.

Als Datengrundlage wurden Datensätze für Basis-Layer, Gebäudestruktur, Wärme-Erzeugung und Wärme-Verbräuchen von Wohngebäuden gewählt. Zu den verwendeten Datensätzen gehören Amtliche Basiskarten, OpenStreetMap Daten, Digitale Verwaltungsgrenzen von Gemeinden, ALKIS-Hausumringe, Zensus Gebäude-, Wohnungs- und Einwohnungsdaten, Schutzgebiete der Landschaftsinformationssammlung des LANUV, Energie-Erzeugungs-Anlagen Standorte des LANUV inklusive Standorten mit KWK-Relevanz und Industrieller Abwärme sowie Raumwärmeverbrauchs-Modelle des LANUV.

Es wurde ein Python-Tool entwickelt, welches modular für alle genannten Datensätze anwendbar ist. Die ausgewählten Datensätze werden automatisch räumlich zugeschnitten, anhand einstellbarer Filter auf gewünschte Merkmale (Zensus) oder Energieträger (Erzeugungs-Anlagen Standorte) reduziert und für die Nutzung in QGIS aufbereitet z.B. durch Reformatierung oder Georeferenzierung.

Darüber hinaus können Synthese-Datensätze erstellt werden. Diese sind zum Einen Zensus-Merkmal-Ausprägungen (z.B. Baualtersklassen) zugewiesene ALKIS-Hausumringen und zum Anderen aggregierte estmierte Wärmeverbräuche des Raumwärmeverbrauchs-Modells des LANUV in einstellbaren Sub-Arealen. Daraus abgeleitet werden spezifische Wärmeverbräuche je Flächeneinheit und Jahr einzelner Sub-Areale als Indikator für die Eignung von Wärmenetzen. Als Sub-Areale können INSPIRE-konformen Gitterzellen, Baublöcken einer Gemeinde, Quartiere, Stadtteile oder beliebige Polygone verwendet werden.

Optional können auto-generierte Pre-Analyse-Dateien mit statistischen Auswertungen im .csv-Format erstellt werden. Diese umfassen u.a. Häufigkeits-Verteilungen von Zensus Merkmals-Ausprägungen im originalen, zugeschnittenen Zensus-Datensatz sowie im erstellbaren Synthese-Datensatz aus Zensus-Gebäudedaten und ALKIS-Hausumringen.

Für die Darstellung der aufbereiteten Daten in QGIS wurden Layer-Style-Definitionen im Github-Repository dieser Arbeit gemeinsam mit dem Python-Tool und der Thesis zum Download bereit gestellt.

Exemplarisch wurde das Tool auf eine Beispielregion um die eingestellten Gemeinden Wuppertal, Velbert und Solingen hin angewandt. Die aufbereiteten Daten für die Region wurden in QGIS visualisiert und exemplarisch analysiert.

---

# Abstract

The sustainable heat transition with the aim to decarbonise the heat sector is integral part of the sustainable energy transition to reach climate-neutral energy systems. The decarbonisation of the heat sector can on the one hand be reached by lowering the heat consumption on the other hand by raising the share of renewable energies in the heat generation. For the realisation of both options exist plenty of technological methods. Which one is the best according to individual local conditions can be determined by heat plans (Wärmeplanungen). Based on analysis of the status quo and potentials as well as set-up target scenarios local sustainable heat transition strategies are developed. An extensive data base is therefore needed e.g. regarding the composition of buildings, the heat consumption and the heat generation.

The aim of this thesis on the one hand is to search and select useful data for heat planning and on the other hand to develop a python-tool for systematic preparation of the chosen data for an export to QGIS.

As data base were data sets chosen for base layers, composition of buildings, heat generation and heat consumption in residential buildings. The chosen data sets are official base maps (Amtliche Basiskarten), OpenStreetMap data, digital administrative borders of municipalities (Digitale Verwaltungsgrenzen), ALKIS house footprints (ALKIS-Hausumringe), Zensus building, flat and population data (Zensus Gebäude-, Wohnungs- und Einwohnungsdaten), protected areas of the landscapes information collection (Landschaftsinformationssammlung) of LANUV, energy generation units positions (Energie-Erzeugungs-Anlagen standorte) including positions of combined heat and power generation relevance and industrial waste heat (Standorte mit KWK-Relevanz und Industrieller Abwärme) as well as space heating demand models (Raumwärmebedarfs-Modelle) of LANUV.

The developed python tool can modularly applied on each mentioned data set. The chosen data sets are automatically spatially cropped, reduced according to settable filters for desired features (Zensus) or energy sources (energy generation units positions) and prepared for usage in QGIS e.g. by reformatting or georeferencing.

Moreover synthesis data sets can be created. One is modified ALKIS house footprints with allotted Zensus building feature characteristics (e.g. construction age classes). The other one are modified sub areas with aggregated estimated heat consumptions from the heat space heating demand model of LANUV. Hence specific heat consumptions per square meter and year are derived for each sub area as an indicator for the suitability of heat grids. Sub areas can be chosen at will e.g. city blocks, urban quarters, urban districts or any kind of polygons.

Optinally it is possible to create auto-generated pre-analysis files in .csv-format for statistical analyses. These include among others the incidence of occurring Zensus feature characteristics both in the original Zensus building dataset and in the synthesis data set derived from the Zensus building dataset and the ALKIS house footprints dataset.

To display the preprocessed data in QGIS layer style definitions are made available in the github repository of this work together with the python tool and the thesis.

Exemplarily the tool was applied on a sample region around the preset municipalities Wuppertal, Velbert and Solingen. The preprocessed data was visualised in QGIS and exemplarily analysed.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Problemstellung & Ziele . . . . .	2
1.3 Aufbau der Thesis . . . . .	2
<b>2 Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Wärmewende in Deutschland . . . . .	3
2.1.1 Ausgangssituation . . . . .	4
2.1.2 Politische Zielvorgaben . . . . .	11
2.1.3 Wärmeplanung am Beispiel von Vojens Fernwärmennetz in Dänemark . . . . .	12
2.1.4 Wärmenetze als Systemdienstleister in integrierten zukunftsfähigen Energiesystemen . . . . .	14
2.2 Wärmeplanung Prinzipien . . . . .	15
2.2.1 Prozess der Wärmeplanung . . . . .	15
2.2.2 Akteure, Aktricen, Andere beteiligte . . . . .	18
2.2.3 Rechtslage in Deutschland . . . . .	20
2.2.4 Vergleich mit Dänemark: Rechtslage und Wärmeversorgung . . . . .	20
2.3 Geoinformationssysteme (GIS) . . . . .	21
2.3.1 Koordinaten-Bezugssystem . . . . .	21
2.3.2 QGIS . . . . .	22
2.3.3 Datentypen und Dateiformate . . . . .	22
<b>3 Datengrundlage</b>	<b>26</b>
3.1 Sichtungsprozess und Daten-Aquise . . . . .	26
3.1.1 Erforderlicher Daten . . . . .	26
3.1.2 Voraussetzungen und Bewertungskriterien . . . . .	27
3.1.3 Sichtungsprozess und mögliche Datenquellen . . . . .	28
3.1.4 Überblick zu Datenquellen nach Anwendungsbereich . . . . .	29
3.2 Datensätze-Beschreibung . . . . .	30
3.2.1 Gemeindeverzeichnis-Informationssystem (GV-ISys) . . . . .	30
3.2.2 Digitale Verwaltungsgrenzen NRW [BKG] . . . . .	31
3.2.3 Amtliche Basiskarte (ABK) (Raster-Graphik) . . . . .	31
3.2.4 OpenStreetMap (OSM) Basiskarte (Vektor-Graphik) . . . . .	32
3.2.5 Schutzgebiete der Landschaftsinformationssammlung (LINFOS) [LANUV] . . . . .	33
3.2.6 Hausumringe im Amtlichen Liegenschaftskataster-Informationssystem [ALKIS] . . . . .	34
3.2.7 Gebäude- und Wohnungsbestand [Zensus2011] . . . . .	34
3.2.8 INSPIRE Daten und Dienste [BKG] . . . . .	38
3.2.9 Energie-Erzeugungs-Anlagen-Standorte NRW [LANUV] . . . . .	39
3.2.10 Energie-Erzeugungs-Anlagen-Standorte BRD [MaStR] . . . . .	42
3.2.11 Raumwärmeverbedarfs-Modell NRW [LANUV] . . . . .	42

---

3.2.12	EE-Ausbaupotential NRW [LANUV] . . . . .	43
3.2.13	Daten Geologischer Dienste für Geothermie-Potential-Bestimmungen . . . . .	44
3.2.14	Wärmenetze: Bestand und typische Kennzahlen . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Software-Entwicklung</b>	<b>45</b>
4.1	Anforderungen: Lastenheft . . . . .	45
4.2	Setup: Software, Hardware, IDE . . . . .	45
4.3	Entwurf: Software-Architektur . . . . .	46
4.4	Implementation: Teil I - Preprocessing . . . . .	48
4.4.1	GV-ISys . . . . .	49
4.4.2	Digitale Verwaltungsgrenzen (DVG) . . . . .	49
4.4.3	ABK . . . . .	50
4.4.4	OSM . . . . .	50
4.4.5	Hausumringe [ALKIS] . . . . .	51
4.4.6	Raumwärme-Bedarfsmodell [LANUV] . . . . .	52
4.4.7	Zensus 2011 . . . . .	52
4.4.8	Energie-Erzeugungs-Anlagen Standorte NRW [LANUV] . . . . .	55
4.4.9	Schutzgebiete Landschaftsinformationssammlung (LINFOS) [LANUV] . . . . .	56
4.5	Implementation: Teil II - Postprocessing . . . . .	57
4.5.1	Kombination von Hausumringen [ALKIS] und Gebäude-Merkmalen [Zensus] . . . . .	57
4.5.2	Aggregation von Werten in Sub-Arealen (Demo: Baublöcke Wuppertal) . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Analyse</b>	<b>61</b>
5.1	Baselayer: OSM, ABK . . . . .	61
5.2	Hausumringe [ALKIS] . . . . .	63
5.3	Zensus 2011 Datensätze . . . . .	66
5.3.1	Zensus Merkmals-Ausprägungs-Statistiken . . . . .	67
5.3.2	Zensusdaten visuelle Auswertung in QGIS . . . . .	70
5.4	Raumwärme-Bedarfsmodell [LANUV] . . . . .	74
5.5	Erzeugungs-Anlagen Strom, Wärme [LANUV] . . . . .	74
5.6	Hausumringe mit Merkmals-Zuweisung aus Zensus-Gebäudedaten . . . . .	77
5.7	Wärmenetz-Ausbaupotential in Wuppertal . . . . .	81
<b>6</b>	<b>Schlussbetrachtungen</b>	<b>85</b>
6.1	Fazit . . . . .	85
6.2	Ausblick . . . . .	87
<b>Abbildungsverzeichnis</b>		<b>91</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>		<b>92</b>
<b>Akronyme</b>		<b>93</b>
<b>Literatur</b>		<b>93</b>
<b>X</b>		

---

Weiterführende Literatur 100

A Anhang 101



---

# 1 Einleitung

»Das rekordwarme Jahr 2022 sollte für uns alle ein erneuter Ansporn sein, beim Klimaschutz endlich vom Reden zum Handeln zu kommen. Wir haben es bisher nicht geschafft, wirkungsvoll auf die Treibhausgasbremse zu treten. Die Erderwärmung schreitet nahezu ungebremst voran.« Dies schrieb Tobias Fuchs, Vorstand Klima und Umwelt des Deutschen Wetterdienstes (DWD) am 30.12.2022 in der Pressemitteilung zum Deutschlandwetter im Jahr 2022 [52].

Die Wärmewende ist ein guter Ansatz, um, wie Tobias Fuchs schreibt, »zum Handeln zu kommen«. Im Zuge der Energiewende rückt die Wärmewende immer mehr in den Fokus der politischen Agenden, da die Wärmeversorgung einen erheblichen Anteil am Energieverbrauch und der gesamten Treibhausgasbilanz ausmacht. Um die Dekarbonisierung des Wärmesektors zu erreichen, müssen daher Maßnahmen ergriffen werden, um den Energieverbrauch zu senken und den Anteil erneuerbarer Energien in der Wärmeversorgung zu erhöhen.

Mit dieser Master-Thesis soll durch die Entwicklung eines python-Tools zur systematische Aufbereitung von Daten für Wärmeplanungen ein positiver Beitrag für die Wärmewende geleistet werden.

## 1.1 Motivation

In den letzten zwei Jahrzehnten hat sich nicht viel getan hinsichtlich der zu erreichenden Klimaneutralität im Wärmesektor. Gas und Öl sind nach wie vor die Haupt-Energieträger zur Wärmebereitstellung. [27]

Um Klimaneutralität im Wärmesektor zu erreichen, benötigt es sowohl eine Verbrauchsreduzierung als auch einen Umstieg auf Erneuerbare Energien als Wärmequellen, kurz gesagt: Eine umfassende Wärmewende. Ob nun energetische Sanierungen, beispielsweise durch Austausch von Heizungstechnologien oder der Erhöhung des Dämmstandards und/oder der Anschluss an ein Wärmenetz oder die Erschließung bestimmter neuer Wärmequellen im jeweiligen Einzelfall die beste Lösung darstellt hängt dabei von zahlreichen Faktoren ab.

Mithilfe von Wärmeplanungen lassen sich zielgerichtet Strategien entwickeln, um den Wärmeverbrauch insgesamt zu senken und um den Bedarf nachhaltig und klimafreundlich zu decken. Wärmeplanungen können somit dazu dienen, klimagerechtere Entwicklungspfade und Handlungsperspektiven aufzuzeigen. Damit sind Wärmeplanungen ein wirkungsvolles Instrument der Wärmewende.

Zur Durchführung von Wärmeplanungen sind eine umfassende Datengrundlage und geeignete Werkzeuge zur Aufbereitung der vorhandenen Daten vonnöten. Deshalb ist die Sichtung und Auswahl geeigneter Daten und die Entwicklung von passenden Software-Tools von besonderer Wichtigkeit.

## 1.2 Problemstellung & Ziele

Eine fundierte Auswahl der geeigneten Strategie je nach Region lässt sich hierbei nur bestimmen, wenn die Datenlage eine ausreichende Analyse des Ist-Zustandes und eine Gegenüberstellung der verschiedenen Optionen in Bezug auf deren Wirtschaftlichkeit, Machbarkeit und Klima-, Umwelt- und Sozialverträglichkeit erlaubt.

Wärmeplanungen erfordern hierfür eine umfassende und detaillierte Datengrundlage u.a. zum Wärmeverbrauch, zur Gebäudestruktur, Wärmeerzeugung und EE-Ausbaupotentialen. Daten zum Gebäudebestand umfassen beispielsweise Parameter wie Baualtersklassen, Bewohnung, Dämmstandards, Heizungstechnologien und Verbräuche. Daten zur Erzeugung umfassen beispielsweise Anlagen der Energieerzeugung mit Parametern wie Anlagentypen, installierte Leistungen, jährliche Wärmeerträge, Standorte und Energieträger.

Ziel dieser Arbeit ist die Sichtung und Bewertung öffentlich zugänglicher Daten hinsichtlich ihrer Eignung für Wärmeplanungen und die Entwicklung eines Software-Tools in Python, welches zur systematischen Aufbereitung der als geeignet bewerteten Daten für die Nutzung in QGIS eingesetzt werden kann.

## 1.3 Aufbau der Thesis

Die Master-Thesis ist neben dieser Einleitung gegliedert in die Kapitel Grundlagen, Datengrundlage, Software-Entwicklung, Analyse, Fazit und Ausblick. Zum Überblick über den Aufbau der Thesis wird im Folgenden kurz der Inhalt der jeweiligen Kapitel geschildert.

Zu Beginn werden im Kapitel Grundlagen grundlegende Informationen zur Wärmewende in Deutschland aufgezeigt. Diese schließen allgemeine Daten zum Gebäudebestand sowie der Sanierungsentwicklung und des -potentials mit ein. Darüber hinaus werden die Prinzipien von Wärmeplanungen erläutert und eine Einführung in Geoinformationssysteme (GIS) gegeben.

Danach wird im Kapitel Datengrundlage zunächst die Methodik für den Sichtungsprozess zur Daten-Akquise beschrieben und daraufhin deren Ergebnisse präsentiert. Zudem werden die akquirierten Datensätze einzeln detaillierter charakterisiert, nach Inhalt und Format beschrieben und bewertet.

Im Kapitel Software-Entwicklung wird anfangs anhand der Aufgabenstellung der Thesis ein Lastenheft für das geplante python-Tool definiert. Neben der Beschreibung des Hardware- und Software-Setups für die Entwicklung wird aufbauend auf dem Lastenheft und den Erkenntnissen der Daten-Akquise ein Entwurf der Software-Architektur skizziert. Der größte Teil des Kapitels umfasst eine detaillierte Beschreibung der Implementation der entworfenen Funktionalitäten im python-Tool.

Im Anschluss wird das entwickelte Tool im Kapitel Analyse exemplarisch auf eine Beispielregion angewandt und die Ergebnisse präsentiert und ausgewertet. Aufgrund der Vielzahl verwendeter Datensätze und des hierfür konzipierten modularen Aufbaus des Tools wird die Analyse schrittweise für einzelne Datensätze bzw. Funktionalitäten des Tools durchgeführt.

Abschließend wird im Kapitel Schlussbetrachtung ein Résumé zu den gewonnenen Erkenntnissen und zur Praktikabilität des entwickelten Tools gezogen, daraus Handlungsempfehlungen abgeleitet und ein Ausblick für zukünftige Arbeiten im Bereich Wärmeplanung präsentiert.

---

## 2 Grundlagen

Um Klimaneutralität zu erreichen bedarf es einer grundlegenden Transformation des Agrar-, Energie-, Verkehrs- und Wärmesektors. Die Durchführung von Wärmeplanungen stellt dabei ein effektives Instrument für die erfolgreiche Transformation des Wärmesektors dar. Für die Erstellung eines Tools zur systematischen Aufbereitung von Daten für Wärmeplanungen werden in diesem Kapitel die notwendigen Grundlagen ermittelt. Dazu gehören Hintergrundinformationen zur Wärmewende in Deutschland, Wärmeplanungen und Geo-Informations-Systemen.

In Abschnitt 2.1 wird die Bedeutung von Wärmeplanungen im Kontext der Wärmewende illustriert. Hierfür werden Eckdaten zum Ist-Zustand und zu den politischen Zielvorhaben der Wärmewende in Deutschland beschrieben, exemplarisch die Wärmeplanung eines Fernwärmennetzes in Dänemark vorgestellt und zusätzlich welche Rolle Wärmenetze in zukünftigen Energiesystemen spielen können präsentiert.

Danach wird in Abschnitt 2.2 erläutert, welchen Prinzipien Wärmeplanungen folgen. Dazu gehört der Aufbau, der Inhalt und die Herangehensweise bei der Erstellung von Wärmeplanungen.

Zum Schluss werden in Abschnitt 2.3 die Eigenschaften und Funktionen von Geo-Informations-Systemen erklärt, und hilfreiche Informationen geliefert, um mit diesen zu arbeiten.

### 2.1 Wärmewende in Deutschland

Entscheidend für die Bedeutung des Wärmesektors auf dem Weg zu Klimaneutralität ist dessen Anteil an den gesamten Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen). Wie der Status Quo in Deutschland hinsichtlich der geplanten Wärmewende aussieht, welche politischen Zielvorgaben es hierfür gibt und wie eine gelungene Umsetzung aussehen kann, wird in den folgenden Unterkapiteln näher beschrieben.

In Unterabschnitt 2.1.1 wird hierfür ein Überblick zur Entwicklung der THG-Emissionen in Deutschland nach Sektoren gegeben, gefolgt von einer Analyse des Gebäudebestandes, des gesamten Wärmeverbrauchs und der Struktur der Wärmeversorgung in Deutschland.

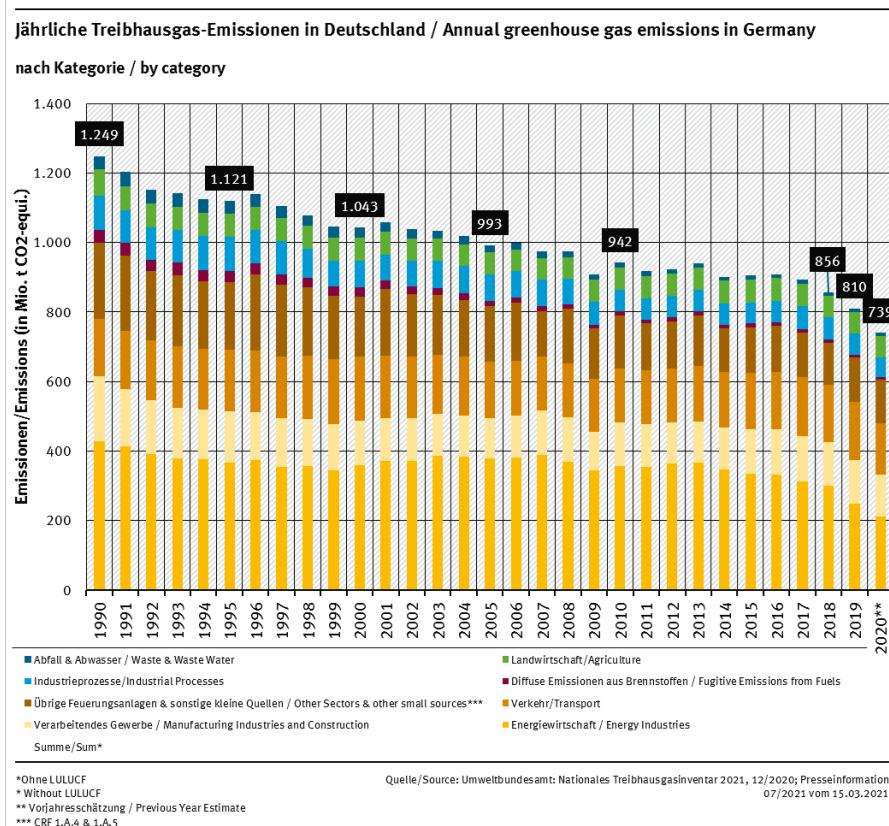
Danach wird in Unterabschnitt 2.1.2 die aktuelle Zielsetzung der deutschen Bundesregierung bezüglich der Wärmeversorgung beschrieben und die prognostizierten THG-Emissionen bei Erreichen der Ziele mit den Zielen des Pariser Klimaabkommens verglichen.

Daraufhin wird in Unterabschnitt 2.1.3 als Muster-Beispiel gelungener Wärmeplanung das Fernwärmennetz in Vojen, Dänemark, vorgestellt.

Zuletzt wird in Unterabschnitt 2.1.4 die Rolle von Wärmenetzen als Systemdienstleister und deren Funktion in zukunftsfähigen integrierten Energiesystemen beschrieben.

## 2.1.1 Ausgangssituation

Eine genaue Bilanzierung des Wärmesektors an den THG-Emissionen gestaltet sich aufgrund stark wetterbedingter Schwankungen und ungenauer Datenlage schwierig. Abbildung 2.1 zeigt die Entwicklung der jährlichen THG-Emissionen für Deutschland vom Referenzjahr 1990 (1249 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente) bis 2019 inkl. Vorjahres-Schätzung für 2020 (810 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente) nach Zahlen des Umweltbundesamts. Die Reduktion der gesamten THG-Emissionen von 2019 gegenüber 1990 entspricht ca. 35%. [25]



**Abbildung 2.1** Entwicklung der jährlichen Treibhausgas-Emissionen in Deutschland[25]

Private Haushalte tragen hauptsächlich durch den Betrieb von Feuerungsanlagen (Anteil von braun) für die Raumwärme- und Warmwasseraufbereitung zur Emission von THG bei. Industrieprozesse (blau) und verarbeitendes Gewerbe (gelb) tragen ebenso einen erheblichen Anteil an Emissionsbelastung bei, wobei diese ebenfalls nur zum Teil auf den anfallenden Wärmebedarf zurückzuführen ist. [25]

Die Sektoreneinteilung des Umweltbundesamts in der betrachteten Abbildung lässt somit nur bedingt Rückschlüsse auf den genauen Anteil des Wärmesektors an den gesamten THG-Emissionen zu. Anderen Sektorenaufteilungen der THG-Emissions-Daten des Umweltbundesamts beziffern den Anteil des Gebäudesektors mit ca. 16,9% im Jahr 1990 (dabei 10,6% durch Haushalte und 5,3% durch GHD (ohne Militär und Landwirtschaft)) und ca. 15,2% im Jahr 2021 (dabei 11,1% durch Haushalte und 3,9% durch GHD (ohne Militär und Landwirtschaft)).[58]

## 2.1.1.1 Gebäudebestand in Deutschland

Die Analyse des Gebäudebestands in Deutschland umfasst in den folgenden Unterkapiteln u.A. eine Beschreibung der Altersstruktur, der Entwicklung des flächenspezifischen Heizbedarfs nach Baualter und der durchschnittlichen Wohnfläche pro Person und der Sanierungsquoten. Zudem enthalten sind Referenzen für die Zusammensetzung eines klimaneutralen Gebäudebestandes und Verweise zu weiterführender Literatur.

Um den Gebäudebestand näher analysieren zu können bietet sich eine normierte Typologisierung an, damit Gebäude strukturiert anhand ihrer verschiedenen Parameter energetisch bewertet werden können. Eine Einteilung in verschiedene Gebäudetypen nach Größen- und Baualterklassen wird beispielsweise durch das IWU gegeben. [45]

### Altersstruktur des deutschen Gebäudebestands:

In Tabelle A.1 sind die Wohnflächen und Häufigkeiten des deutschen Wohngebäudebestands nach den Zahlen aus dem Zensus 2011 gegeben. Zu erkennen ist, dass ein Großteil des Gebäude- und Wohnungsbestandes (60% bzw. 62%) aus der Zeit vor 1969 stammt. Die aggregierte Wohnfläche der Wohnungen bis 1969 macht dabei einen Anteil von 48% der gesamten Wohnfläche aus. Dieses ungleiche Verhältnis resultiert aus der in den letzten Jahrzehnten durchschnittlich gestiegenen Wohnfläche/Wohnung [45].

## Entwicklung des energiesparenden Bauens

Primärenergiebedarf Doppelhaushälfte – Heizung [ $\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$ ]

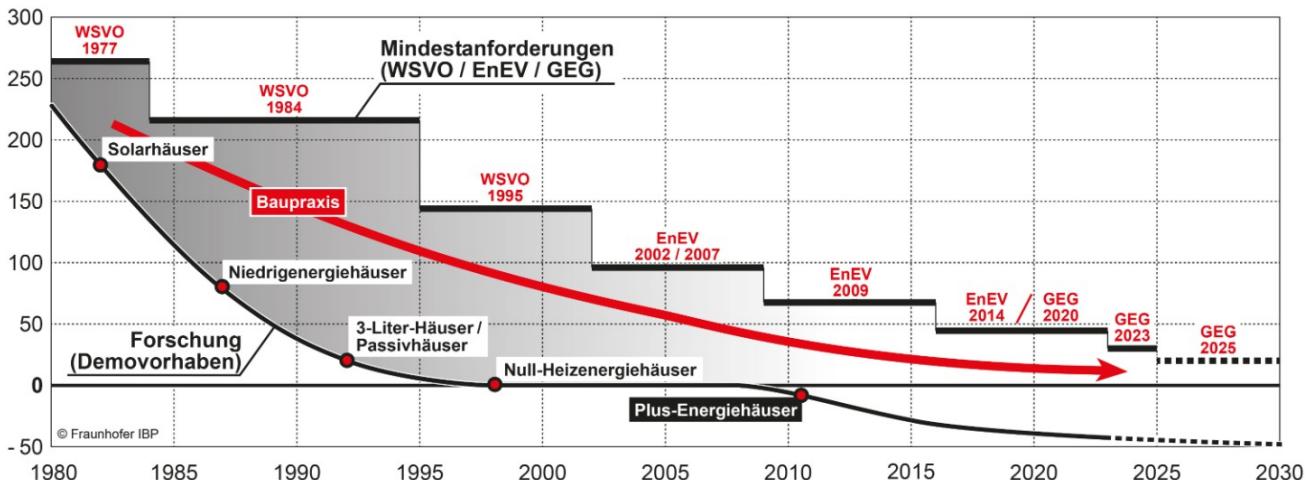


Abbildung 2.2 Entwicklung des spezifischen Wärmebedarfs von Gebäuden: Regulatorische Mindestanforderungen, Baupraxis und Forschung [5]

### Entwicklung des flächenspezifischen Heizbedarfs:

Der typische flächenspezifische Primärenergiebedarf zum Heizen ist bei Altbauten historisch deutlich höher als in modernen Gebäuden. Abbildung 2.2 zeigt exemplarisch die Entwicklung des Primärenergiebedarfs in den letzten Jahrzehnten von 1980 bis 2020 inkl. Prognose bis 2030. Das Fenster von in der Baupraxis üblichen Werten wird begrenzt durch gesetzlich vorgeschriebene Mindeststandards (oberer Treppenverlauf) und Beispiel-Demo-Bauten aus Forschungsprojekten

zu energiesparendem Bauen und ambitionierten ökologisch orientierten Hausprojekten (unterer Linie). Der Heizbedarf ist in Neubauten von 1980 bis 2020 in 40 Jahren von über  $250 \frac{kWh}{m^2}$  auf unter  $50 \frac{kWh}{m^2}$  gesunken, was einer Reduktion von über 80% entspricht. [5]

### Entwicklung der genutzten Wohnfläche/Person:

Das Wuppertal-Institut misst in seiner Transformations-Studie(?) *CO<sub>2</sub>-neutral bis 2035* der Frage: "Wie viel Wohnfläche ist genug?", eine zentrale Rolle zu. Für die mittelfristige Dekarbonisierung des Gebäudesektors wird hervorgehoben, dass diese Frage mit den anderen beiden Leitfragen: "Wie energieeffizient sollten Gebäude sein?", und: "Wie sollten die Gebäude beheizt werden?", integrativ (statt isoliert voneinander) betrachtet werden muss.

Die Pro-Kopf-Wohnfläche in Deutschland ist in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich angestiegen. Anfang der '60er Jahre lag sie noch bei  $19 \frac{m^2}{Person}$ , 1990 dann bei  $35 \frac{m^2}{Person}$  und im Jahr 2018 bereits  $47 \frac{m^2}{Person}$ , was eine erhebliche Steigerung des Ressourcenbedarfs pro Kopf bedeutet. [88, S. 93]

### Sanierungsquoten und -quoten:

Der Heizbedarf von Altbauten lässt sich durch energetische Modernisierungsmaßnahmen wie nachträgliche installierten Dämmungen verbessern, allerdings werden Sanierungsarbeiten nicht zentral erfasst, weder quantitativ noch qualitativ. Laut einer 2018 großangelegten durchgeföhrten Datenerhebung des IWU betrug die jährliche energetische Sanierungsrate zwischen 0,8% (im Zeitraum 2005 bis 2008) und 1,0% (im Zeitraum 2010 bis 2016). [19, S. 149]

Die Untersuchung des IWU gibt auch Zahlen zu typischen Dämmquoten von Gebäuden nach IWU-Basis-Geäudetypen (EFH, ZFH, MFH) und an den Mikrozensus angelehnte Baualterklassen in Hessen an. Die zusammengefassten Ergebnisse für alle Gebäudetypen mit größerer Zeiteinteilung sind in Tabelle 2.1 gegeben. Zu erkennen ist ein erhebliches theoretisches Potential für nachträgliche Dämmungen.

**Wohngebäude in Hessen mit Wärmedämmung (bei Bau / nachträglich) nach Bauteilen**

Baujahr	Außenwand		Dach/Obergeschossdecke		Fußboden/Kellerdecke	
	Wohngebäude mit Dämmung des jeweiligen Bauteils					
alle	41,8 % +/- 1,4 %	21,7 % +/- 1,1 %	80,3 % +/- 1,5 %	41,6 % +/- 1,3 %	34,1 % +/- 1,0 %	10,3 % +/- 0,8 %
bis 1978	37,4 % +/- 1,6 %	31,1 % +/- 1,7 %	73,5 % +/- 1,7 %	58,1 % +/- 1,8 %	23,5 % +/- 1,3 %	14,3 +/- 1,0 %
ab 2010	65,7 % +/- 4,3 %		98,3 % +/- 0,4 %		86,1 % +/- 2,2 %	
<b>gedämmte Flächenanteile (falls Dämmung vorhanden)*</b>						
alle	81,1 % +/- 2,6 %	72,7 % +/- 2,7 %	93,2 % +/- 0,4 %	90,4 % +/- 0,5 %	91,3 % +/- 0,6 %	80,3 % +/- 1,4 %
bis 1978	73,9 % +/- 3,3 %	72,2 % +/- 2,9 %	90,7 % +/- 0,5 %	90,1 +/- 1,4 %	85,4 % +/- 1,0 %	80,1 % +/- 1,5 %
ab 2010	96,1 % +/- 5,5 %		99,7 % +/- 0,2 %		97,6 % +/- 0,6 %	
<b>gedämmte Bauteilfläche (Gebäude gewichtet mit Flächenanteilen)</b>						
alle	33,8 % +/- 1,5 %	15,8 % +/- 1,0 %	74,8 % +/- 1,4 %	37,6 % +/- 1,2 %	31,1 % +/- 1,0 %	8,3 % +/- 0,7 %
bis 1978	27,7 % +/- 1,7 %	22,4 % +/- 1,5 %	66,7 % +/- 1,6 %	52,3 % +/- 1,8 %	20,1 % +/- 1,1 %	11,5 % +/- 0,9 %
ab 2010	63,1 % +/- 5,5 %		98,0 % +/- 0,4 %		85,0 % +/- 2,3 %	
<b>Wärmedämmung</b>	<b>bei Bau</b>	<b>nachträglich</b>	<b>bei Bau</b>	<b>nachträglich</b>	<b>bei Bau</b>	<b>nachträglich</b>

\* Flächenanteile Dach/Obergeschossdecke und Fußboden/Kellerdecke aus der Vorgängererhebung „Datenbasis Gebäudebestand (vgl. [Diefenbach et al. 2010]), Tabelle 4.1-1 auf S.

**Tabelle 2.1** Wohngebäude in Hessen mit Wärmedämmung bei Bau bzw. nachträglich durch energetische Modernisierungs-Maßnahmen [19, S. 108], eigene Darstellung

Weitere relevante Daten zum Gebäude- und Sanierungsstand bietet der Hintergrundbericht *Wohnen und Sanieren - Empirische Wohngebäudedaten seit 2002*. Die zugrundeliegende Studie wurde durchgeführt von der gemeinnützigen GmbH co2online (im Folgenden kurz co2online) und

herausgegeben vom Umweltbundesamt im Jahr 2019. In der Studie wird die co2online Datenbank ausgewertet, in welcher seit 2003 Daten aus der Nutzung deren Online-Energieberatungs-Tools erfasst werden. Zum Zeitpunkt der Studie umfasste diese ca. eine Millionen Datensätze. Zudem werden die Daten abgeglichen mit anderen Datensätzen u.A. der Wohngebäude-Bestands-Untersuchung des IWU aus dem Jahr 2016. [48]

Ein Überblick zu den Modernisierungsraten nach Bauteil im Vergleich mehrerer Untersuchungen findet sich in Tabelle 2.2. Die Studie von co2online kommt hier zu ähnlichen Ergebnissen wie die Vergleichsstudien.

**Tabelle 7: Bauteilmordenisierungsraten im Vergleich**

Maßnahme	co2online-Gebäudedatenbank	IWU/BEI Datenbasis Gebäudebestand 2010	IWU Datenbasis Gebäudebestand 2016	IÖW 2010 ENEF Haus <sup>25</sup> nur EZFH
Heizungserneuerung	3,17	2,8-3,5	3,05	2,6
Einbau Solarthermie	1,02	0,85-1,21	0,87	0,6
Fassadendämmung	0,87	0,82-1,06*	0,79*	0,9
Dach/OG-Dämmung	1,43	1,32-1,65	1,69	1,7
Kellerdeckendämmung	0,49	0,34-0,42	0,46	0,3
Fenstererneuerung	1,56*	1,34-1,80*	1,82*	1,6

\*flächengewichtet, d.h. Berücksichtigung von Teilsanierungen

Quellen: co2online 2011 (b), Institut Wohnen und Umwelt & Bremer Energie Institut (2018)

**Tabelle 2.2 Bauteilmordenisierungsraten im Vergleich** [48, S. 41]

### Limitierungen und Hindernisse für Sanierungsarbeiten:

Das effektive Sanierungspotential wird teils durch regulatorische Restriktionen (Fassaden-Denkmalsschutz) oder geometrisch-technisch bedingte Limitierungen begrenzt. Ein weiteres Hindernis kann die Eigentumsstruktur und Kostenverteilung in Mietwohnungen darstellen, da Heizkosten i.d.R. von Bewohnenden gezahlt werden, für Sanierungen aber Wohnungsbesitzende zuständig sind. Hinzu kommen finanzielle und zeitliche Faktoren, dass sich energetische Sanierungen als Langzeitinvestitionen nicht unmittelbar rentieren und teils mit erheblichen Aufwand verbunden sind, was eine Weiternutzung einer Immobilie während Sanierungsarbeiten nicht immer erlaubt. Auf diese und weitere Hindernisse wird auch im Paper Wärmewende im Quartier - Hemmnisse bei der Umsetzung am Beispiel energetischer Quartierskonzepte aus dem Jahr 2016 vom Deutschen Institut für Urbanistik (difu) eingegangen. [54]

### Eigentumsstruktur des deutschen Wohnungsbestands:

Die Datenerhebung des Zensus 2011 hat ergeben, dass 43,6% der Wohnungen in Deutschland von deren Eigentümer\*innen bewohnt werden, 51,4% zu Wohnzwecken vermietet werden und 4,4% leer stehen, Stand 2011. Die verbleibenden 0,6% der Wohnungen in Deutschland wurden

als Ferien- und Freizeitwohnungen genutzt. [89, S. 42ff]

#### Klimaneutraler Gebäudebestand bis 2035:

Das Wuppertal-Institut kam 2019 zur Einschätzung, dass eine Dekarbonisierung des Gebäudesektors bis 2035 möglich sei, wenn auch mit erheblichen Anstrengungen verbunden. Dafür müsste die jährliche energetische Sanierungsrate auf rund 4 % gesteigert werden. [88, S. 95]

Als Referenz wie die Beschaffenheit eines klimaneutralen Gebäudebestandes aussehen könnte, kann zudem die Untersuchung *Klimaneutraler Gebäudebestand 2050* des Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2015 dienen. In der genannten Studie wird untersucht, wie sich ein Gebäudebestand realisieren ließe, welcher im Jahr 2050 einen nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf von mindestens 80 % geringer als im Referenzjahr 2008 aufweist. Hierfür wurden verschiedene Zielbilder für 2050 und daraus abgeleitete Transformationspfade entwickelt. Die Festlegung auf das Jahr 2050 entsprang der damaligen politischen Zielsetzung aus dem Jahr 2015. [16]

#### Weiterführende Literatur zum Gebäudebestand in Deutschland:

Eine umfangreiche Liste mit weiterführender Literatur und Datenquellen zum Wohngebäudebestand und Gebäude-Energiebilanzen in Deutschland findet sich im Hintergrundbericht *Wohnen und Sanieren - Empirische Wohngebäudedaten seit 2002* des Umweltbundesamtes. [48, S. 59ff]

### 2.1.1.2 Wärmeverbrauch in Deutschland

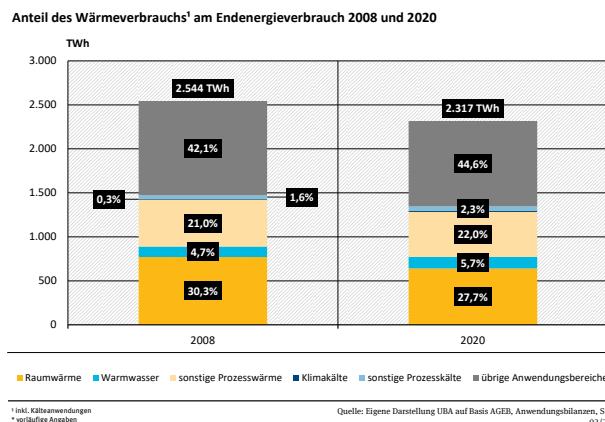
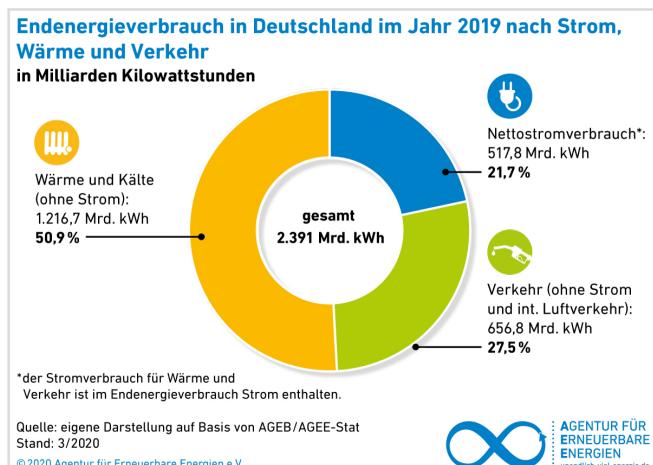
Ein guter Indikator für die Bedeutung des Wärmesektors sowohl hinsichtlich Klimaneutralität als auch Ressourcenunabhängigkeit ist dessen Anteil am Endenergieverbrauch.

Der Anteil von Wärme und Kälte (ohne Strom) beträgt in etwa die Hälfte des gesamten Endenergieverbrauch in Deutschland. Abbildung 2.3a zeigt exemplarisch die Anteile für Wärme und Kälte (ohne Strom), Verkehr (ohne Strom und int. Flugverkehr) und Nettostromverbrauch am gesamten Endenergieverbrauch von 2391 TWh im Jahr 2019 nach Zahlen der Agentur für Erneuerbare Energien e.V.. [4]

In etwa die Hälfte des Wärmebedarfs in Deutschland ging im Jahr 2020 auf die Erzeugung von Raumwärme zurück, etwa 10% auf die Erwärmung von Warmwasser und der große Rest auf die Erzeugung von Prozesswärme. Die Anteile für Raumwärme, Prozesswärme und Warmwasser am Endenergieverbrauch werden exemplarisch in Abbildung 2.3b vergleichsweise für die Jahre 2008 und 2020 gezeigt. Darstellung Zahlen stammen vom Umweltbundesamt. [27]

Hervorzuheben ist, dass es sich bei beiden Graphiken um den Endenergieverbrauch handelt. Der Verbrauch fossiler Primärenergieträger ist ohne Berücksichtigung deren unterschiedlicher Anteile an der Erzeugung von Wärme, Strom und Mobilität neben Erneuerbaren Energien sowie der unterschiedlichen Wirkungsgrade konventioneller thermischer fossiler-Energieträger-betriebener Kraftwerke im Strom- und Verbrennungs-Motor-Antriebe im Verkehrssektor nicht direkt ableitbar.

Der Primärenergiebedarf für Deutschland betrug laut Datenreport Umwelt, Energie und Mobilität des Statistischen Bundesamtes aus dem Jahr 2021 insgesamt 13.170 PJ (ca 3.658 TWh) im Jahr 2018. Vom Gesamtprimärenergiebedarf entfielen dabei ca. 39 % auf die Industrie, 33 % auf private Haushalte und 26 % auf die Dienstleistungsbereiche. Der Primärenergiebedarf privater Haushalte teilt sich wiederum zu knapp zwei Dritteln (64 %) auf den Bereich Wohnen



**a** Anteil des Wärmesektors am Endenergieverbrauch in Deutschland 2019 [4]

**b** Aufteilung des Wärmeverbrauchs auf Raumwärme, Prozesswärme und weitere.[27]

**Abbildung 2.3** Wärmeverbrauchs-Anteil am Endenergieverbrauch, aufgeteilt in Raum- und Prozesswärme

und etwa ein Drittel (36 %) auf den Bereich Mobilität (motorisierter Individualverkehr) auf. Der Energieverbrauch privater Haushalte im Bereich Wohnen nach Energieträger im Jahr 2018 wird hier gesamt mit 2703 PJ (ca. 751 TWh) angegeben, wovon der Großteil (ca. 82,8 %) für die Erzeugung von Wärme aufgewendet wird die verbleibenden 17,2 % direkt in Form von Strom genutzt werden. [13]

Eine direkter Vergleich der verschiedenen Zahlen und eine genaue Bilanzierung des Energieverbrauchs oder der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Wärmesektors aufgeteilt nach Sektoren gestaltet sich schwierig. Die gefundenen Daten stammen teils aus anderen Jahren, folgen unterschiedlichen Aufteilungen (i.d.R. nach Sektoren, Energieträger oder Funktion) oder sind älter als 18 Jahre.

Für das Jahr 2004 findet sich eine simultanen Aufteilung des Endenergieverbrauchs nach Sektoren (Industrie, GHD, Haushalte, Verkehr) und Funktionen (u.A. Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme) in dem im Jahr 2007 veröffentlichten Sachstandsbericht Wohnen, Energie, Mobilität des Umweltbundesamtes. Im Jahr 2004 betrug der Anteil von Haushalten 46,7 %, von der Industrie 33,1 % und von GHD 20,0 % am gesamten Wärmeverbrauch. [56, S. 27]

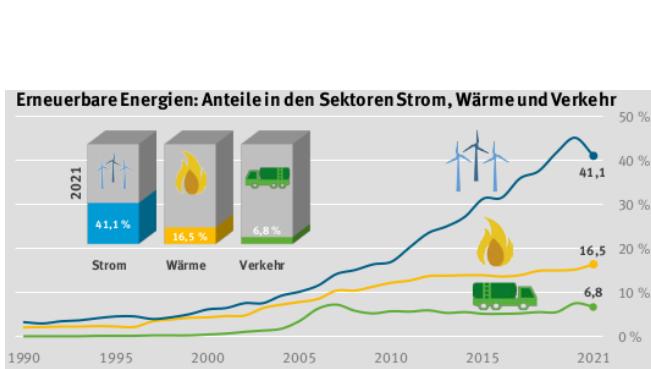
Aktuellere Zahlen zu den energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen zum Heizen (temperaturbereinigt) in privaten Haushalten liefert das Statistische Bundesamt in seinen umweltökonomischen Gesamtrechnungen. Das Heizen privater Haushalte in Deutschland trug nach diesen Rechnungen im Jahr 2020 mit 144 Mio. t CO<sub>2</sub> den größten Teil (72,5 %) der in privaten Haushalten zum Wohnen anfallenden Emissionen von insgesamt 199 Mio. t CO<sub>2</sub> bei und verursachte damit in etwa 18,4% der gesamten im Jahr 2020 in Deutschland angefallenen THG-Emissionen von 825 Mio. t CO<sub>2</sub> gemäß Kyoto-Protokoll. [61, S. 20] [62, S. 16]

Das Statistische Bundesamt ermittelt diese CO<sub>2</sub>-Emissions-Zahlen mit Modellrechnungen in einem Bottom-Up-Verfahren anhand von Gebäude- und Wohnungsdaten aus dem Mikrozensus und flächenspezifischen Heizenergie-Verbräuchen bei Heizöl, Gas und Fernwärme gemäß Heizspiegel der gemeinnützigen Beratungsgesellschaft co2online mbH sowie anderen Quellen und Schätzungen. Die Daten sind zudem temperaturbereinigt durch Verrechnung der Heizgradtage. [60]

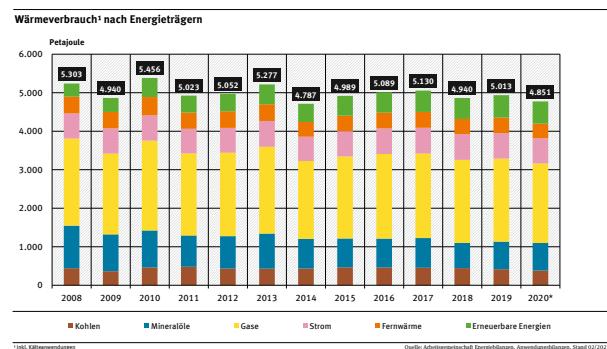
Das UBA kommt zum Vergleich in seinen Berechnungen zu einem Ergebnis von 91 Mio t CO<sub>2</sub>-Äq. energiebedingte Emissionen für Haushalte in Deutschland im Jahr 2020. [59]

### 2.1.1.3 Wärmeerzeugung in Deutschland

Die Wärmeerzeugung in Deutschland wird noch zum größten Teil mit fossilen Brennstoffen bewerkstelligt, wobei Gas etwa die Hälfte und Öl noch ca. ein Siebtel der gesamten Versorgung ausmacht. Der Anteil der Erneuerbaren an der Wärmeerzeugung betrug 1990 noch einen verschwindend geringen Anteil von ca. 2 Prozent was sich auch bis ca. 1996 nicht änderte. Erst ab 1996 stieg der Anteil Erneuerbarer in einem Zeitraum von etwa 2 Jahren, um 2 Prozent an, stagnierte dann wieder etwas bis 2005 als er ca 5 Prozent betrug. Ab 2005 stieg der EE-Anteil in annähernd linearer Progression auf 14 Prozent im Jahr 2012, was einer Wachstumsrate von etwa 1,29 Prozent pro Jahr entspricht. Danach stagnierte das Wachstum wieder bis 2017, als der EE-Anteil wieder einen kurzen Anstieg auf etwa 15 Prozent im Jahr 2018 stieg und dann schlechend auf 16,5 Prozent im Jahr 2021 stieg. Das bedeutet, dass auch 2021 noch lediglich ein Sechstel der Wärme durch EE erzeugt wurde und der Zuwachs der EE im Wärmesektor selbst in bis dato größten Wachstumsphasen kaum mehr als ein Prozent pro Jahr betrug. [27] [3]



a Entwicklung des Anteils Erneuerbarer Energien nach Sektor Strom, Wärme und Verkehr, 1990 bis 2021 [6]



b Entwicklung des Gesamt-Wärmeverbrauchs nach Energieträger von 2008 bis 2021 [7]

Abbildung 2.4 Entwicklung des Anteils Erneuerbarer Energien im Wärmesektor in Deutschland

In Abbildung 2.4a ist zum Vergleich die Entwicklung des relativen Anteils Erneuerbarer im Wärme-, Strom- und Verkehrssektor von 1990 bis 2021 dargestellt nach Zahlen des Umweltbundesamts.

Die Entwicklung der Anteile der verschiedenen Energieträger inklusive Fernwärmennetzen an der Wärmeerzeugung respektive des Verbrauchs von 2008 bis 2019 mit damaliger Prognose für 2020 nach Zahlen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen ist in Abbildung 2.4b gezeigt. Zu erkennen ist, dass sich sowohl der Gesamtverbrauch als auch die kalorische relative Zusammensetzung nach genutzten Energieträgern für die Wärmeerzeugung in den letzten 15 Jahren nur geringfügig geändert hat. Gleicher gilt für den geringen Anteil von Fernwärme-Netzen an der WärmeverSORGUNG. 2019 betrug der Fernwärme-Anteil ca. 8 Prozent, der direkte EE-Anteil ca. 12 Prozent der stromgewonnene Anteil ca. 13 Prozent an der WärmeverSORGUNG. Der durchschnittliche

Anteil an EE im Stromsektor betrug 2021 ca. 41,4 Prozent und an der Fernwärme-Gewinnung ca. 21,7 Prozent. Auch in Fernwärmenetzen wurde 2021 noch etwa 43,6 Prozent der Wärme aus Gas gewonnen, womit die Zahlen von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen und vom Umweltbundesamt zu ähnlichen Ergebnissen kommen.

## 2.1.2 Politische Zielvorgaben

Für die Wärmewende relevante Zielvorgaben der Bundesregierung sind in mehreren Gesetzen, Verordnungen und Richtlinien festgelegt. Am bedeutendsten für die Klimaziele der Bundesregierung auf Bundesebene im Allgemeinen und für den Wärmesektor ist das Klimaschutzgesetz (KSG). Ebenfalls von hoher Relevanz für die Wärmewende ist das Gebäudeenergiegesetz (GEG). Ein grober Überblick über den Inhalt der erwähnten Gesetze wird in den folgenden zwei Unterkapiteln gegeben. Zudem werden die Klimaziele des KSG mit dem 1,5-Grad-Ziel des ebenfalls von der Bundesregierung mit unterzeichneten internationalen Pariser Klima-Abkommens verglichen.

Gesetze, Verordnungen und Richtlinien zur praktischen Umsetzung der Wärmewende, wie planungsrechtliche, baurechtliche, umweltrechtliche oder andere Regulationen sowie Förderungsbestimmungen werden in diesem Kapitel nicht weiter betrachtet.

### 2.1.2.1 Klimaziele des Klimaschutzgesetzes (KSG)

Im novellierten KSG von 2021 hat die deutsche Bundesregierung ihre Klimaziele nach oben angepasst mit den Zielvorgaben nunmehr bis 2045 (statt 2050) Klimaneutralität zu erreichen und die THG-Emissionen bis 2030 um min. 65 % (statt 55 %) und bis 2040 um min. 88 % gegenüber 1990 zu verringern.[41][15]

Aus den im KSG angegebenen sektorspezifischen THG-Reduktionspfaden bis 2030 (mit Ausnahme der Energiewirtschaft) und den prozentualen Reduktionszielen bis 2040 und Annahmen zum zukünftigen Einbezug natürlicher CO<sub>2</sub>-Senken und der weiteren Entwicklung der nicht CO<sub>2</sub>-THG-Emissionen lässt sich ein CO<sub>2</sub>-Budget ableiten.

Der Sachverständigen-Rat für Umweltfragen (SRU) listet in seiner Stellungnahme zur KSG-Novellierung verschiedene Untersuchungen zu Berechnungen des aus dem KSG resultierenden CO<sub>2</sub> Budgets, die auf Ergebnisse zwischen 6,4 und 7,4 Gt CO<sub>2</sub>-Emissionen ab dem Jahr 2022 kamen.[81, S. 14] Vergleich: [42, S. 12], [82, S. 11], kommt in der aktualisierten Version von 2022 sogar auf ein aus dem KSG abgeleitetes CO<sub>2</sub>-Budget von 7,9 Gt CO<sub>2</sub>-Emissionen, [57] German Zero leitet aus dem KSG einen Beitrag zur globalen Erderwärmung ab, der einer Erwärmung von 1,8°C entspräche. [12, S. 37]

Selbst unter Einhaltung der KSG-Ziele würde die deutsche Bundesregierung demnach das vereinbarte 1,5°C-Ziel des Pariser Klimaabkommens sehr wahrscheinlich verfehlen. Ein erheblicher Fortschritt gegenüber früheren Klimaschutz-Ambitionen stellt das KSG dennoch dar, da es zumindest einem Beitrag entspricht, der die Erderwärmung auf unter 2,0°C hält.

## 2.1.2.2 Gebäudeenergiegesetz (GEG)

Das Gebäudeenergiegesetz, kurz GEG, heißt mit vollem Namen »Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden«. Das GEG wurde entworfen, um die Inhalte von der Energieeinsparverordnung (EnEV), dem Energieeinsparungsgesetz (EnEG) und dem Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) zusammenzufassen. Darüber hinaus wurden im GEG auch die Inhalte der EU-Gebäuderichtlinie (EPBD) und der EU-Energieeffizienzrichtlinie (EED) auf nationaler Ebene umgesetzt. Informationen finden sich z.B. im offiziellen Gesetzestext und Infoportalen von Energiedienstleistern. [34][49][20]

Das GEG liefert unter Anderem Vorgaben zur energetischen Qualität von beheizten oder klimatisierten Wohn- und Nichtwohngebäuden mit einer Nutzfläche größer  $50\text{ m}^2$ . Diese sind bei Neubau und Sanierung zu beachten und setzen Anforderungen an die Heiz- und Klimatechnik sowie Mindeststandards für die Wärmedämmung und den Hitzeschutz. [49]

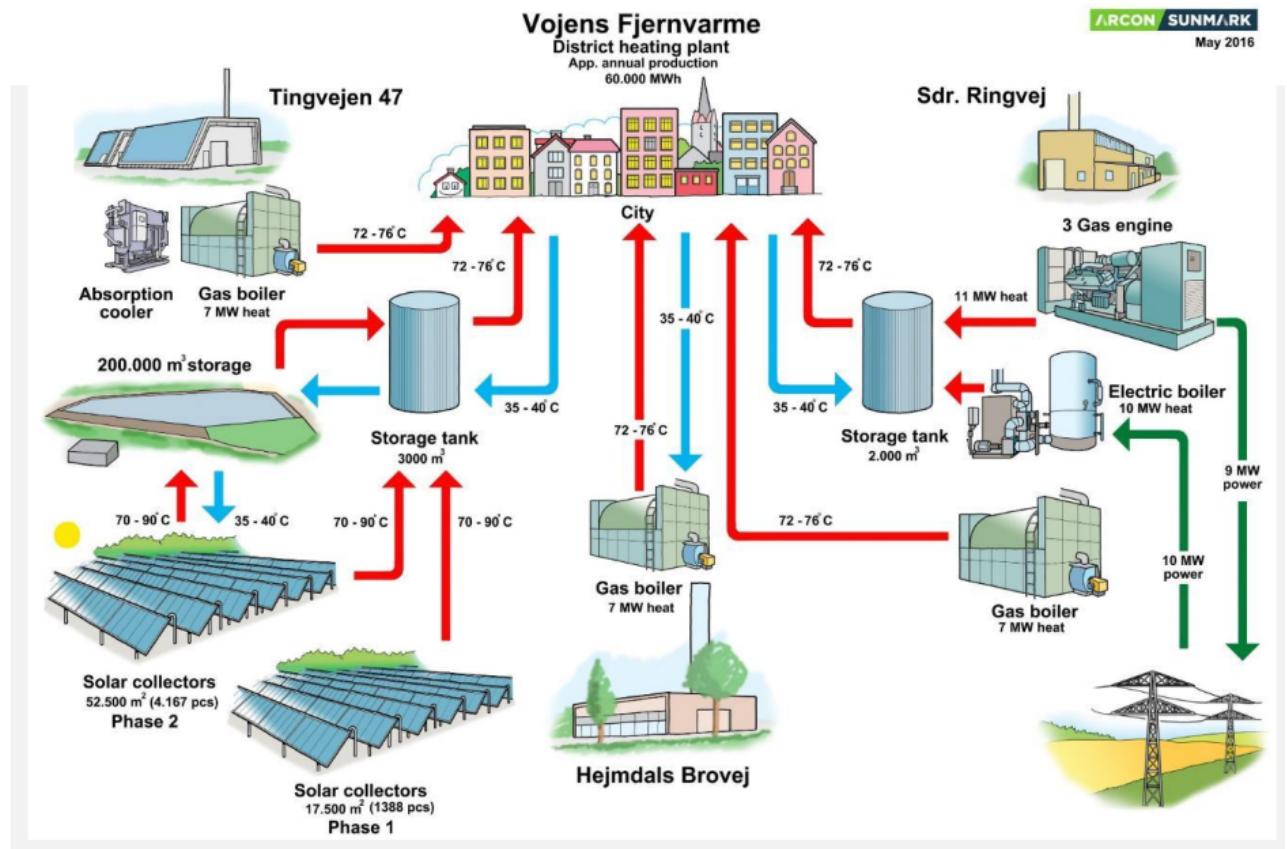
Für den maximalen Primärenergiebedarf eines Neubaus galt bis zum 1. Januar 2023 ein maximaler Energieverbrauch von 75 % eines Referenzgebäudes (Effizienzhaus 75 bzw. EH/EG 75 Standard). Dieser wurde abgelöst durch EH/EG 55 und soll 2025 durch EH/EG 40 abgelöst werden. Der anzurechnende Primärenergiebedarf wird bestimmt durch die Multiplikation des eigentlichen Bedarfs mit einem Primärenergiefaktor, welcher vom jeweiligen Energieträger abhängt (bspw. 0 für Solarenergie, 1,1 für Erd- bzw. Flüssiggas und Heizöl).[49][20]

Für die Heiztechnik in Neubauten ist ein Mindest-Anteil an Erneuerbaren-Energien festgeschrieben. Dieser beträgt, je nach verwendetem Energieträger, 15 % bei Solarthermie, 30 % bei Biogas mit KWK oder Brennstoffzelle und 50 % für Biogas mit Gas-Brennwertkessel, feste Biomasse (z.B. Pelletheizung), Flüssige Biomasse, Wärmepumpe oder Fernwärme. [49][20]

## 2.1.3 Wärmeplanung am Beispiel von Vojens Fernwärmennetz in Dänemark

Wie erfolgreiche Wärmeplanung aussehen kann zeigt beispielsweise das Fernwärmennetz in Vojen, Dänemark. Laut Betreiber\*innen-Angabe versorgte das Netz 2.005 Verbraucher\*innen im Jahr 2018. Abbildung 2.5 zeigt die Anlagen-Zusammensetzung in Vojens Fernwärmennetz. [68]

Die Wärme wird erzeugt mittels 3 Gasmotoren und 2 Gasboiler mit insgesamt 25 MW Wärmeleistung, 2 Gaskessel mit insgesamt 13,3 MW Wärmeleistung, einem Gasboiler mit Absorptionskältemaschine (welche das Rauchgas vor Austritt auf 20°C abkühlt), Sonnenkollektoren auf 70.000  $\text{m}^2$  Fläche und einem Teichwärmespeicher mit 200.000  $\text{m}^3$  Fassungsvermögen. Die Eckdaten des Kabelbaums werden angegeben mit ca. 52 km Hauptstrecken, ca. 40 km Netzkabel und einer Wassermenge in der Leitung von ca. 1.300  $\text{m}^3$ . Das Wärmennetz deckt dabei wie im Netzplan von 2006(!) in Abbildung A.1 zu erkennen ist den Großteil der Ortschaft ab. [68][67][66]



Quelle: <http://www.vojensfjernvarme.dk/media/4240290/vojens-f-a4.jpg>

**Abbildung 2.5** Wärmeerzeuger im Fernwärmennetz Vojens [14, S.40]

Energieträger [Anteile in Prozent]					
Jahr	Anteil Erneuerbare*	Solar-Thermie	Elektrische Heizstäbe	Gas	Öl
2020	42,00	37,50	5,70	56,80	0,00
2021	59,00	43,10	21,20	35,60	0,00
2022	62,76	44,90	24,80	25,40	4,90

Anmerkung: \*Solarthermie-Anteil inkl. Anteil elektrischer Heizstäbe bei viel Wind

Kommentar: 2022 weniger CO<sub>2</sub> als Luft-Wärmepumpe [keine Angabe zu anderen Jahren]

**Tabelle 2.3** Relative Anteile der Energieträger im Fernwärmennetz Vojen nach Betreiber\*innen Deklarationen 2020, 2021 und 2022 [64]

Der Wärmeabsatz zwischen 2004/2005 und 2017/2018 betrug zwischen minimal 38.329 MWh (2006/2007) und 49.556 MWh (2010/2011). Absolute Zahlen zu den Jahren danach sind auf der Betreiber\*innen-Seite nicht angegeben, allerdings dürften sich diese in einer ähnlichen Größenordnung bewegen. Für die Jahre 2020, 2021 und 2022 hat das Versorgungsunternehmen

Deklarationen veröffentlicht mit Angabe der relativen Anteile der einzelnen Energieträgern am Wärme-Mix, welche in Tabelle 2.3 aufgelistet sind. Der Anteil der Erneuerbaren erreicht durch Nutzung von Solarthermie, Windstrom gespeister elektrischer Boiler und dem Wärmespeicher in den 3 gezeigten Jahren Werte zwischen 42 und 63 %. Der Anteil von ca. 30 % aus Gas und Öl im Jahr 2022 soll noch durch eine große Wärmepumpe ersetzt werden.

Auch unter Annahme gleichbleibender absoluter Anteile an Erneuerbaren ergibt eine Witterungsbereinigung mittels Korrekturfaktor aus den Heizgradtagen der besagten 3 Jahre und jenen aus der Referenzperiode 2003 bis 2022 (20 Jahre) ähnliche Anteile an Erneuerbaren. Die jährlichen Heizgradtage in Dänemark im selben Zeitraum betrugen 3019,14 Kd/a (2022), 3263,77 (2021) und 2920,71 (2020) bzw. im Schnitt 3183,21 Kd/a. Daraus ergäben sich nach folgender Rechnung EE-Anteile von 66,17 % (2022), 56,57 % (2021) und 45,77 % (2020). [64]

$$EE_{bereinigt} = \frac{EE_{unbereinigt}}{k} = EE_{unbereinigt} \cdot \frac{HGT_{Durschnitt}}{HGT_{Bezugsjahr}}$$

Das Fernwärmennetz Vojen ist bereits jetzt ein Muster-Beispiel für kommunale Wärmeversorgung mit hohem EE-Anteil und besitzt Vorzeige-Charakter mit dem ambitionierten Vorhaben mittels Wärmepumpen vollkommen auf Erneuerbare umzusteigen.

### Weitere Pilotprojekte in Baden-Württemberg in Deutschland

Die KEA-BW stellt auf ihrer Webseite einige "Best-practice-Projekte für kommunale Wärmeplanung in Baden-Württemberg vor. Die Versorgungsstruktur der einzelnen Projekte sind dabei sehr individuell auf die jeweiligen lokalen Gegebenheiten angepasst. Beispiele ist u.A. das SolarHeatGrid in Ludwigsburg, welches mit einer Kollektorfläche von 14.800 m<sup>2</sup> die größte Solarthermie-Anlage in Deutschland im Jahr 2020 darstellte mit einer Wärmeerzeugung von 5.500 MWh/a inkl. 2.000 m<sup>2</sup> großem Wasser-Wärmespeicher. Das Wärmenetz in Malsch erzeugt beispielsweise 2.000 MWh/a an Wärme mit einer Kombination aus: Seewasser-Kollektor mit Wärmepumpe, Biogas-BHKW, Holzhackschnitzel-Kessel, Gas-Spitzenlast-Kessel und einem Wärmespeicher. Davon stammen 450 MWh/a aus dem See. [87]

## 2.1.4 Wärmenetze als Systemdienstleister in integrierten zukunftsfähigen Energiesystemen

Wärmenetze können als Schnittstelle zwischen Strom- und Wärmesektor wichtige Systemdienstleistungen übernehmen. Daher wird ihnen zum Beispiel von der Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH (KEA-BW) in ihrem Positionspapier aus dem Jahr 2014 zur Bedeutung von Wärmenetzen für die Energiewende eine signifikante Rolle für die Dekarbonisierung von Energiesystemen zugeschrieben. [38]

Im Leitfaden für kommunale Wärmeplanungen der KEA-BW sind die im Positionspapier aufgelisteten Aufgaben, welche Wärmenetze bedienen können, in etwa wie folgt zusammengefasst [43, S. 18]:

- Erschließbarmachung lokaler erneuerbarer Energien (Solarthermie, Tiefe Geothermie, Umweltwärme, Biomasse)
- Deckung von Bedarfslücken der Stromerzeugung aus Wind und Solar durch bedarfsgerecht

betriebene, stromnetzgeführte KWK-Anlagen

- Bereitstellung von Regelleistung durch stromnetzorientiertes Temperatur-Toleranz-nutzendes Demand-side-Management z.B. beim Einsatz von Wärmepumpen
- Flexibilitätszugewinn im Wärme- und Stromsektor durch Einbindung großer thermischer Speicher
- Erhöhung der Systemeffizienz durch Nutzbarmachung von Abwärme
- Instrument sein mit Steuerungsfunktion für Kommunen z.B. um THG-Emissionen zu vermeiden

Diese Eigenschaften von Wärmenetzen machen kommunale Wärmeplanungen zu einem wichtigen Instrument im Zuge der Energiewende, um klimafreundlich und ressourcenschonend eine zukunftssichere und ökonomisch-tragfähige Wärmeversorgung zu gewährleisten.

## 2.2 Wärmeplanung Prinzipien

Wärmepläne verfolgen das Ziel eine Status-Quo-Analyse zur Wärmestruktur im jeweils untersuchten Gebiet zu ermitteln, eine Potentialanalyse für vorhandene Ausbaupotentiale für die Wärmeversorgung, eine Formulierung des Zielszenarios und der Umsetzungsstrategie.

Welche Aufgabenschritte eine Wärmeplanung voraussetzt und wie diese angegangen werden sowie die Rolle der beteiligten Akteur\*innen wird in diesem Kapitel näher beschrieben.

### 2.2.1 Prozess der Wärmeplanung

Einen guten Überblick über das Vorgehen beim Durchführen von Wärmeplanungen gibt der strategische Leitfaden für kommunale Wärmeplanungen der KEA-BW. Die Beschreibung der einzelnen Prozessschritte in diesem Unterkapitel ist stark an diesen angelehnt. Der Prozess umfasst dabei die folgenden vier Elemente Bestandsanalyse, Potentialanalyse, Aufstellung des Zielszenarios und Wärmewendestrategie. [43]

#### 2.2.1.1 Bestandsaufnahme

In der Bestandsaufnahmen wird der vorhandene Wärmebedarf und -verbrauch sowie die daraus resultierenden THG-Emissionen ermittelt. Darüber hinaus werden Informationen zum Gebäudebestand (Typen und Altersklassen), Versorgungsstruktur inklusive vorhandener Gas- und Wärmenetze, Heizzentralen und Speicher gesammelt. Eine weitere Orientierung für die Bestandsaufnahme gibt auch die Unterteilung der zu erfassenden Daten bezüglich Gemeindestruktur und Energiebilanz.

##### Informationen zur Gemeindestruktur umfassen:

- Gebäudebestand (Alter, Nutzungsart), Gebietstyp, Wohndichte

- Bestehende Wärmenetze, Gasnetze, Lage und Leistung von Heizzentralen sowie KWK-Anlagen und beschlossene Projekte der Wärmeversorgung
- Bestehendes Glasfasernetz und Ausbaupläne für mögliche gemeinsame Tiefbaumaßnahmen beim Wärmenetzausbau

#### Energie- und THG-Emissions-Bilanz:

Für die Ermittlung der Energiebilanz bieten sich zwei Verfahren an:

- 1) Bottom-Up (räumlicher aufgelöster Wärmebedarf -> aggregiert für das ganze Gebiet)
- 2) Top-Down (Gesamter Wärmebedarf -> Aufschlüsselung der räumlichen Verteilung)

Die Ermittlung der THG-Emissionen ist wichtig, um realistische Zielszenarien und Transformationspfade zu entwickeln. Die THG-Bilanz leitet sich dann aus dem Wärmeverbrauch und der Zusammensetzung der genutzten Energieträger ab. Zur Veranschaulichung beider Bilanzen bietet sich eine Einteilung nach Sektoren und nach Energieträgern wie folgt an:

- Sektoren: private Haushalte; Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD); Industrie; kommunale Einrichtungen
- Energieträger: Erdgas, Heizöl, Erneuerbare, Wärmenetz, Kohle, Sonstige

Anmerkung:

- Statistische Abschätzung Verbrauchsdaten: Ungenau, Abweichung (s. Möller, Wiemers 2019, Wärmeplan Flensburg)
- Verbrauchsdaten/Haus: Genau, von Kommunen je nach Bundesland abfragbar
- Verbrauch bei lagerbaren Energieträgern (Heizöl, Kohle, Pellets) nur bedingt aussagekräftig

### 2.2.1.2 Potentialanalyse

In der Potentialanalyse wird das Einsparpotential für Wärmeverbrauche (Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme) ermittelt und die lokal verfügbaren noch ungenutzten Wärmequellen auf ihr erschließbares Potential hin untersucht. Üblich für die Quantifizierung letzterer ist eine Einteilung nach deren Realisierbarkeit.

#### Potentialklassen von groß nach klein:

- Theoretisches Potential: Physikalisch machbar
- Technisches Potential: Mit Berücksichtigung der Gesetzeslage
- Wirtschaftliches Potential: Mit Berücksichtigung der Gesetzeslage und Wirtschaftlichkeit
- Realistisches Potential

Die verschiedenen Potentiale sind jeweils Teilmenge des nächst höheren Potentials nach Eingrenzung nach bestimmten Aspekten. Das theoretische Potential umfasst alle theoretisch-technisch möglichen Maßnahmen. Unter Berücksichtigung der rechtlichen Rahmenbedingungen ergibt sich daraus das technische Potential. Werden zusätzlich finanzielle Bewertungen nach

Kosten- und Gewinnabschätzungen hinzugezogen ergibt sich daraus die Eingrenzung zum ökonomisch (betriebs- oder volks-)wirtschaftlich sinnvollen Potential, dem technisch-wirtschaftlichen Potential.

Um das realistische Potential für Wärmequellen zu ermitteln wird sukzessiv vorgegangen. Ausgehend vom theoretischen Potential erfolgt die Eingrenzung anhand der Potentialklasseneinteilung. Für die Bestimmung des theoretischen Potentials wird das bestehende Planungs- und Genehmigungsrecht hinzugezogen. Danach werden Annahmen zur technisch wirtschaftlichen Effizienz zur weiteren Eingrenzung getroffen. Ergibt sich kein zielführender Transformationspfad, sind strategische Maßnahmen zu definieren, um neue Potentiale zu erschließen (z.B. die Ausweisung neuer Flächen) und der Wärmeplan wird iterativ angepasst.

Das betrachtete Gebiet für die Potentialanalyse ist grundsätzlich unabhängig von der Einteilung von Kommunen in Einzelgebiete oder Quartiere und von möglichen Versorgungsgebieten. Diese Vorgehensweise wird vorgenommen, da der Raumbezug im Energiesystem der Zukunft sich dynamisch anhand der Entscheidung für einen Transformationspfad hin zum gewählten Zielszenario ergibt. Mithilfe der Erfassung aller (Ab-)Wärmepotentiale kann die lokale Wärmewendestrategie flexibel und zubaufähig mit Szenarien erarbeitet werden. [43]

Die technischen Potentiale lokaler erneuerbarer Energien werden i.d.R. gebietsscharf und Abwärmequellen punktuell erhoben.

### Liste zu untersuchender Wärmequellen

- **Abwärme** (z.B. aus Industrieprozessen, Serverfarmen, Fertigungsanlagen, Abwasser)
- **Umweltwärme** (z.B. aus Flüssen und Seen)
- **PV/Solarthermie** (Freiflächen, Dachflächen)
- **Geothermie** (z.B. max. zulässige Bohrtiefe und Wasserschutzgebiete)
- **Biomasse** (Nachwachsende Reststoffe und Energiepflanzen, Organische Abfälle, Klärgas, Biogas)

### Anmerkungen aus dem Wärmeleitfaden der KEA-BW [43]:

- Deponegas muss nicht ausgewiesen werden, aufgrund vernachlässigbarer Potentiale
- Freiflächen Berücksichtigung ab  $2000\text{ m}^2$  (ca. 270 MWh/a)
- Dachflächen Berücksichtigung ab  $50\text{ m}^2$  Grundfläche (Für Solarthermie 25%, für PV 50% der Grundfläche)

Es gibt bestehende Software-Lösungen zur Bilanzierung des Energiebedarfs und der THG-Emissionen nach Sektoren bzw. Energieträgern wie die von der KEA-BW im Leitfaden für kommunale Wärmeplanungen erwähnten Tools (inkl. Herausgeber) *Klimaschutzplaner* (Klimaschutz-Bündnis), *BICO2BW* (KEA-BW) und *ECOSPEED Region* (ECOSPEED AG), welche entweder kostenpflichtig sind oder nur auf Anfrage bei der KEA-BW bereit gestellt werden.

### 2.2.1.3 Aufstellung Zielszenario

Für die Aufstellung von Zielszenarien für Wärmeplanungen ergibt sich aus dem Klimaschutzgesetz die Mindestanforderung bis 2045 klimaneutral zu sein. Das bedeutet für die Entwicklung der Verbrauchs- und Versorgungsszenarien, dass die Wärmeversorgung bis 2045 vollständig dekarbonisiert sein muss. Ziele die über diese Vorgaben hinausgehen können ebenfalls Grundlage für die Wärmeplanung sein. [15] [43]

Die Mindestanforderungen für die Klimaschutz-Ziele können je nach Landesgesetz auch höher liegen. Beispielsweise sieht das Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz Baden-Württemberg (KlimaG BW) in §10 Abs. 1 das Erreichen der Netto-Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2040 vor. Gemäß der Begriffsbestimmung in §2 Abs. 16 ist »Kommunale Wärmeplanung im Sinne dieses Gesetzes [...] ein strategischer Planungsprozess mit dem Ziel einer klimaneutralen kommunalen Wärmeversorgung bis zum Jahr 2040 einschließlich der Aufstellung eines kommunalen Wärmeplans.«[40]

Für nähere Informationen zur Aufstellung von Zielszenarien sei hier auf den Leitfaden für Kommunale Wärmeplanung der KEA-BW verwiesen. [43]

### 2.2.1.4 Wärmewendestrategie

Die Entwicklung einer geeigneten Wärmewendestrategie, um die in den aufgestellten Szenarien gesetzten Ziele zu erreichen, obliegt den Wärmeplanenden. Für nähere Informationen zur Entwicklung einer Wärmewendestrategie sei hier ebenfalls auf den Leitfaden der KEA-BW für Kommunale Wärmeplanung verwiesen. [43]

## 2.2.2 Akteure, Aktricen, Andere beteiligte

Neben den Kommunen, welche kommunale Wärmeplanungen durchführen, gibt es eine Vielzahl an Agierende, welche während eines Wärmeplanungsprozesses eine Rolle spielen. Als Schlüsselbeteiligte werden im Paper Wärmewende im Quartier - Hemmnisse bei der Umsetzung am Beispiel energetischer Quartierskonzepte des difu aus dem Jahr 2016 auch private Gebäudeeigentümer\*innen, institutionelle Wohnungsunternehmen und Energieversorgungsunternehmen betrachtet. [54]

Die heterogene Struktur der Beteiligten einer lokalen Wärmewende wird auch im Kurzgutachten Kommunale Wärmeplanung des Umweltbundesamtes von Dezember 2022 erwähnt und dort auf die teils sehr kleinteilige Eigentumsstruktur von Gebäuden zurückgeführt und die Tatsache, dass die Infrastruktur zur Versorgung mit Wärme, Gas und Strom in den Händen unterschiedlicher Betreibenden liegen kann. [55]

Eine Darstellung des Beteiligten-Spektrums nach difu ist zum Überblick in Abbildung 2.6 gezeigt. [54]

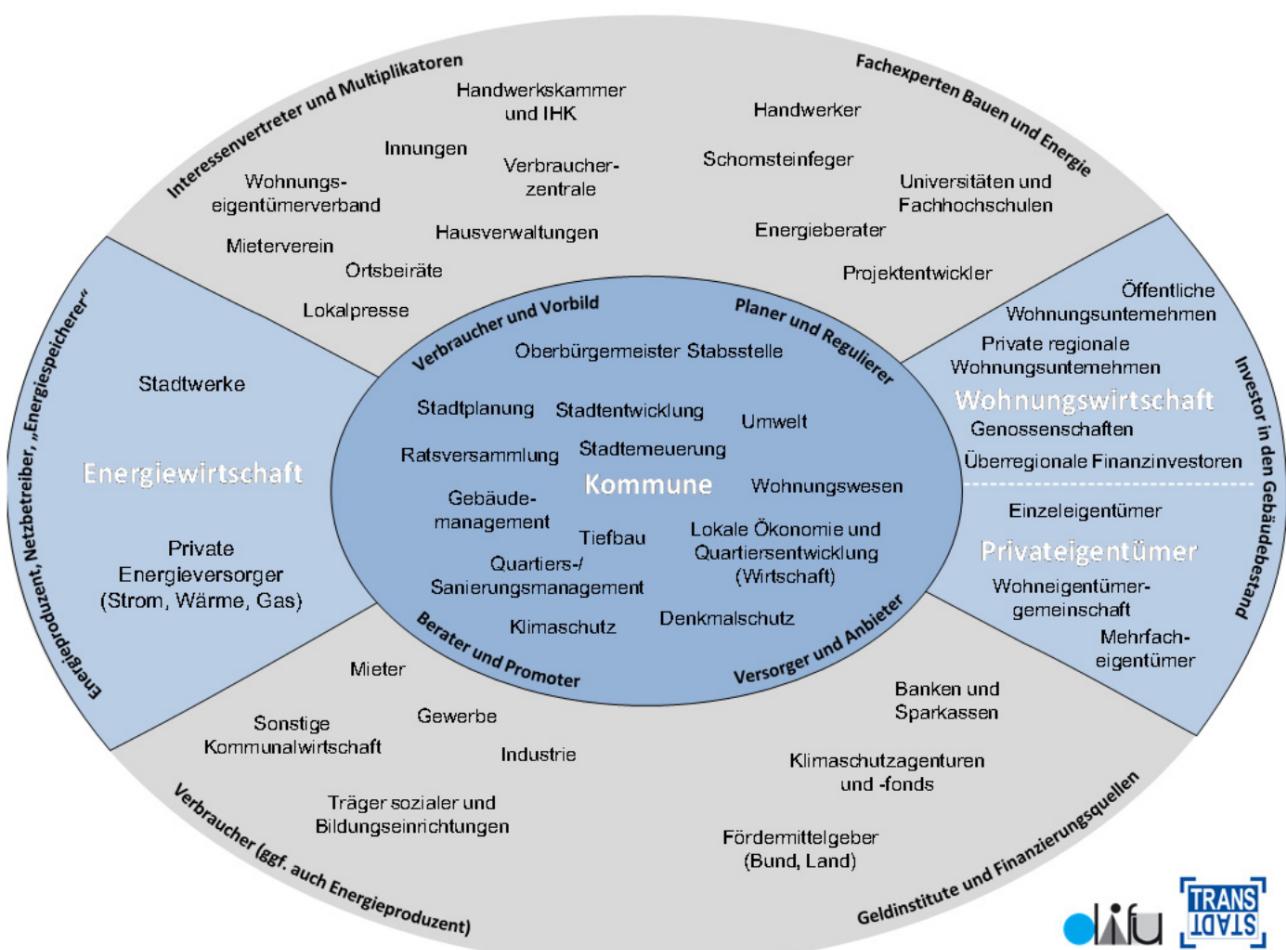


Abbildung 2.6 Beteiligten-Spektrum einer lokalen Wärmewende [54, S. 19]

Sowohl im erwähnten Bericht des difu als auch im Kurzgutachten des UBA wird die Rolle von gesetzgebenden Institutionen wie Bund und Länder vernachlässigt. Erwähnung finden diese z.B. im Abschlussbericht Systemische Herausforderungen der Energiewende des UBA aus dem Jahr 2021. [28, S. 345]

Im Folgenden soll kurz auf die Rolle einiger als Schlüsselbeteiligte betrachteten eingegangen werden und wie sich diese in ihrer Rolle auf lokale Wärmewenden beziehen.

Bund und Länder schaffen die gesetzlichen Rahmenbedingungen für Wärmeplanungen. Dazu gehört zum Beispiel auch die Zuweisung von Rechten und Pflichten an Kommunen, Energieversorgungsunternehmen (EVUs) und Netzbetreibende. Mehrere Möglichkeiten der Einflussnahme von Gesetzgebenden für eine klimagerechtere Wärmeversorgung werden zum Beispiel im Policy Paper Wärmewende in Städten gestalten - Empfehlungen für eine sozial-ökologische Transformation der Wärmeversorgung am Beispiel von Berlin aus dem Jahr 2020 genannt. [24]

Energieversorgungsunternehmen, sowohl private als auch kommunale, besitzen zum einen Anlagen zur Erzeugung von Wärme- und/oder Strom und sind damit im Besitz wichtiger Einheiten der Versorgungsinfrastruktur. Zum anderen besitzen sie genaue Verbrauchsdaten aller Kund\*innen in ihrem Versorgungsgebiet. Darüber hinaus können sie wichtige Akteur\*innen bei der späteren

Umsetzung eines Wärmeplans spielen z.B. durch den Planung, Bau und Inbetriebnahme neuer Anlagen.

Wohnungsunternehmen und private Gebäudeeigentümer\*innen obliegt es energetische Sanierungsarbeiten an ihren Gebäuden durchzuführen bzw. durchführen zu lassen, zudem besitzen sie Informationen zur Gebäudestruktur, beispielsweise auch zu bereits durchgeföhrten oder noch geplanten Modernisierungsmaßnahmen.

## 2.2.3 Rechtslage in Deutschland

Aufgrund des föderalen Charakters der deutschen Bundesrepublik ist die Rechtslage in Deutschland nicht eindeutig und hängt sowohl vom Bundesgesetz als auch den Gesetzen der jeweiligen Ländern ab. Nach Einschätzung der Autor\*innen des Policy Papers »Wärmewende in Städten gestalten - Empfehlungen für eine sozial-ökologische Transformation der Wärmeversorgung am Beispiel von Berlin« aus dem Jahr 2020 vom IÖW reichen die »Die zentralen Instrumente und Maßnahmen der Bundesebene [...] bislang nicht für eine Wärmewende im Sinne der Klimaneutralität.« Da auf lokaler Ebene viel für die Wärmeplanung erforderlichen Wissens vorliege, sehen die Autor\*innen die kommunale Ebene grundsätzlich als geeignete Umsetzungsebene für Wärmeplanungen und heben die Notwendigkeit hervor auf Landesebene einen geeigneten Rechtsrahmen zu schaffen. [24]

Baden-Württemberg hat 2019 im Zuge der Erneuerung des Klimaschutzgesetzes (KlimaG) beschlossen, die größten kreisfreien Städte zu verpflichten bis zum 31.12.2023 Wärmepläne zu erstellen. Eine solche Verpflichtung für Kommunen gibt es in den wenigsten Bundesländern. Zusätzlich gibt es ein landesweites Förderprogramm für die freiwillige kommunale Wärmeplanung für alle Planungskonvois und Gemeinden. Die Möglichkeit der Verpflichtung von Kommunen zu Wärmeplanungen liegt dabei in der Kompetenz der Länder, nicht des Bundes. [55] [24]

Im KlimaG Baden-Württembergs ist auch die Fördermenge für Kommunen für die entstehenden Mehrkosten geregelt. Kommunen werden zudem ermächtigt gebäudegenaue Verbrauchsdaten zum Beispiel von Energieversorgungsunternehmen und Schornsteinfeger\*innen zum Zwecke der Durchführung von Wärmeplanungen zu erheben. Ein kommunaler Wärmeplan in Baden-Württemberg ist nach Erstellung verwaltungsintern verpflichtend und entspricht damit dem Charakter eines Flächennutzungsplans. [40] [43]

Bundesweite Vorgaben zur Energieeffizienz an Neubauten und sanierte Bauten und Vorgaben zum Anteil Erneuerbarer Wärmequellen für die genutzte Heiztechnik gemäß Gebäudeenergiegesetz (GEG) wurden bereits in Unterabschnitt 2.1.2 beschrieben.

## 2.2.4 Vergleich mit Dänemark: Rechtslage und Wärmeversorgung

In Dänemark sind Kommunen bereits seit 1979 anlässlich der Ölkrise 1973 gesetzlich durch das Wärmeversorgungsgesetz zur Durchführung von Wärmeplanungen verpflichtet. Zudem müssen Kommunen Vorranggebiete für Nah- und Fernwärmennetze festlegen. Die Installation von Öl- oder Gasheizungen in Neubauten ist bereits seit 2013 verboten. Seit 2016 ist auch der Austausch alter fossiler Heizungen gegen neue fossile Heizungen verboten. Fossile Energieträger sind zudem höher

besteuert als in Deutschland. [21]

Dänemark ist dabei nicht nur gesetzlicher Vorreiter, sondern auch bei der Umsetzung der Wärmewende. Derzeit werden etwa 63 % der dänischen Haushalte mit Fernwärme versorgt, in Kopenhagen sogar bis zu 98 %. 68 % der genutzten Fernwärme stammt dabei aus Kraft-Wärme-Kopplung, 50 % aus Erneuerbaren Energien. Vom gesamten dänischen Wärmebedarf werden bereits 40 % durch Erneuerbare Energien gedeckt. [21]

## 2.3 Geoinformationssysteme (GIS)

Geoinformationssysteme (GIS) sind Informationssysteme mit denen laut GIS-Wiki nach Ralf Bill (1994) »raumbezogene Daten digital erfasst und redigiert, gespeichert und reorganisiert, modelliert und analysiert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden. «Laut Wikipedia sind GIS Informationssysteme zur »zur Erfassung, Bearbeitung, Organisation, Analyse und Präsentation räumlicher Daten. Geoinformationssysteme umfassen die dazu benötigte Hardware, Software, Daten und Anwendungen.« In manchen Definitionen wird auch die Eigenschaft »rechnergestützt« genannt, welches analoge Karten ausschließt. [47][83]

Die Darstellung verschiedener Geodatensätze in GIS-Anwendungen geschieht in Ebenen (Layer), welche übereinander geschichtet werden. Als Basislayer bieten sich Umgebungskarten an, darüber liegende Layer können Einzelne Objekte bspw. Gebäude oder ähnliches darstellen.

### 2.3.1 Koordinaten-Bezugssystem

Kartographische Darstellungen sind niemals exakt, weil sich eine die Oberfläche eines dreidimensionalen Körpers nicht zugleich flächen- noch winkeltreu auf einer zwei-dimensionalen Fläche abbilden lässt. Das Ziel von Koordinaten-Bezugs-Systemen (KBS), im englischen auch coordinate reference system (CRS) genannt, ist einen einheitlichen Rahmen zu schaffen, zur präzisen Messung von Raumpunkten und zur konsistente Darstellung dieser als Koordinaten, welche eindeutig die gemessenen Raumpunkte wiedergeben.

Ein KBS umfasst ein Koordinaten-System, ein Datum, und eine Projektion. Das Koordinaten-System umfasst dabei einen Ursprungspunkt, Axen, welche vom Ursprungspunkt ausgehen und eine Einheit, in welcher Koordinaten gemessen werden. Das Koordinatensystem kann beispielsweise die Form einer Kugel, eines Ellipsoids, z.B. dem Geodätischen Referenzsystem 80 (GRS 80), oder eines Geoids, z.B. dem Earth Gravitational Model 96 (EGM 96) annehmen. Geoide sind drei-dimensionale geometrische Formen mit delliger Oberfläche, salopp gesagt »Kartoffeln«, mit globusähnlicher Form. [86]

Ein KBS eignet sich je nach gewähltem Koordinatensystem, Datum und Projektion eher für eine möglichst flächentreue oder eher winkeltreue Abbildung, zudem sind die Abweichungen abhängig von der abzubildenden Region auf dem Globus. Veranschaulichen lässt sich dies, durch Verschiebung (Datums-Änderung) und Verformung eines Referenz-Ellipsoids (Koordinatensystem-Änderung) in Bezug zum Globus. Je näher die Referenz-Oberfläche an der Globus-Oberfläche der gewählten Region liegt, desto genauer die Abbildung.

Die Projektion beinhaltet Abbildungsvorschriften, also Definitionen zur Umrechnung der Referenz-Koordinaten in Karten-Koordinaten. Geokoordinaten lassen sich so auch von einem

KBS in ein anderes KBS projizieren bzw. umrechnen. Eine mögliche Projektion ist beispielsweise Lamberts winkeltreue Kegelprojektion oder die ebenfalls auf Johann Heinrich Lambert zurückgehende Flächentreue Azimutalprojektion (englisch Lambert's Azimutal Equal Area Projection). Erstere bildet eine Kugeloberfläche flächentreu auf die Mantelfläche eines Kegels ab, letztere bildet eine Kugeloberfläche flächentreu auf eine Scheibe ab. [85][84]

Als einheitliche Codierung für die allermeisten der weltweit genutzten KBS werden von allen gängigen GIS-Software EPSG-Codes unterstützt. Der EPSG-Datensatz stammt ursprünglich von der namensgebenden European Petroleum Survey Group Geodesy (EPSG), und wird inzwischen vom Geodesy Subcommittee des Geomatics Committee der International Association of Oil & Gas Producers (IOGP) gepflegt. [29]

## 2.3.2 QGIS

QGIS ist ein freie GIS-Software, die unter der GNU General Public Licence (GPL) lizenziert wurde. Das Projekt wurde 2002 gegründet und wird bis heute aktiv fortgeführt. QGIS läuft auf einer Vielzahl an Betriebssystemen, darunter die meisten Unix und unixähnlichen Betriebssysteme (Linux), Windows und macOS. [78][53]

Von QGIS gibt es mehrere Anwendung, zum einen die Desktop-Version mit Graphical User Interface (GUI) zur offline-Nutzung, welche auch im Zuge dieser Arbeit verwendet wurde. Zum anderen gibt es noch eine Server- und eine Web-Client-Version zur online-Nutzung und darüber hinaus noch eine mobile Anwendung für Android, iOS und Windows. [78]

QGIS ist mit einer Vielzahl an Dateiformaten für Geodaten kompatibel. Neben gängigen GIS-Anwendungs-Features verfügt QGIS auch über eine Python-Schnittstelle und eine integrierte Python-Konsole. [53]

## 2.3.3 Datentypen und Dateiformate

Geodatentypen lassen sich prinzipiell in raster- und vektorbasiert unterscheiden. Rasterbasierte Geodaten sind Rastergrafiken (Pixelgrafiken), beispielsweise Satellitenfotos mit Geokoordinaten. Hierbei wird die Auflösung die Anzahl der Pixel bestimmt. Im Gegensatz dazu werden in vektorbasierten Geodatensätzen Objekte als Vektografiken also geometrisch definiert, z.B. als Punkte, Linien oder Polygone, denen Geokoordinaten zugewiesen werden. Die Auflösung wird hier bei Polygonzügen (Mehr-Punkt-Strecken und Vielecke) nur durch die Anzahl der Stützpunkte definiert, ist abgesehen davon aber in der Darstellung beliebig skalierbar.

Die verschiedenen Dateiformate bringen unterschiedliche Vor- und Nachteile mit sich bezüglich Kompatibilität, Speicherplatzbedarf und Geschwindigkeit beim Einlesen in GIS-Software. Zudem lassen sich freie und proprietäre Formate unterscheiden. Ein mögliches Raster-Format ist z.B. GeoTIFF. Mögliche Vektor-Formate sind unter Anderem ESRI Shapefiles (kurz Shapefile), GeoJSON, OGC GeoPackage, FlatGeobuf, OGC GML, SpatialLite, OGC KML (keyhole-markup-language), CSV (z.B. mit WKT) und viele mehr.[53]

Der große Vorteil vektorbasierter Geodaten jedweden Formats ist die Verknüpfbarkeit von geometrischer Figuren (bspw. Hausumringen) mit anderen Daten, welche diesen als Attribute zugewiesen werden (bspw. Baualtersklasse) und deren besserer Wartbarkeit.

Neben den Geodatentypen gibt es noch GIS-Software-spezifische Datentypen wie Projektdateien, Styledateien und weitere, in denen beispielsweise Einstellungen gespeichert werden. In QGIS werden Layer-Styledefinitionen beispielsweise im .xml-Format als .qml-Dateien verwendet. In diesen wird definiert, welche Objekte einer Vektorgraphik wie dargestellt werden. Regelbasierte Darstellungsformen ermöglichen eine differenzierte Darstellung von Geometrieobjekten anhand bestimmter Attributwerte, wahlweise in Abhängigkeit von gesetzten Maßstabsgrenzen, dazu gehört auch eine optionale Beschriftungen von Objekten anhand eines Attributwert, z.B. Ortsnamen, Straßennamen und Flächenbezeichnungen.

### 2.3.3.1 ESRI Shapefiles: Vorteile, Nachteile und Alternativen

Bei den im Zuge dieser Arbeit betrachteten Datensätzen lag ein Großteil der vektorbasierten Daten als Shapefiles vor. Diese sind laut Jachym Cepickys Plädoyer *Switch from Shapefile* (2017) das üblichste vektorbasierte Format. Der Standard für Shapefiles stammt aus dem 1990er Jahren. Ein Shapefile besteht dabei aus mehreren Dateien. Essentiell ist eine .shp-Datei mit den Geometriedaten, eine .dbf-Datei mit den Sachdaten (Attributstabelle) im dBASE-Format und eine .shx-Datei mit Indizes zur Verknüpfung von Geometrie- und Sachdaten. [17][30]

Cepicky nennt in seinem Plädoyer mehrere gravierende Nachteile von Shapefiles. Z.B. sind Attributnamen auf 10 Zeichen begrenzt. Diese werden bei Konvertierung i.d.R. automatisch abgeschnitten, was zu kryptischen Bezeichnungen führen kann. Zudem ist die Definition eines KBS optional und die Dateigröße ist auf 2 GB begrenzt. [17]

Eine vielversprechende Alternative zu Shapefiles ist das offene Format OGC Geopackage. Dieses wird auch von Cepicky als Alternative genannt und für dieses plädiert auch Simon Baier in seinem Blogpost *Why you should use GeoPackage instead of Shapefile*. Seit Version 3 von QGIS ist OGC GeoPackage auch QGIS Standard-Vektorformat (ehemals Shapefile). Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit standardmäßig OGC Geopackage als Speicherformat gewählt. Optional wird versucht Daten auch im Shapefile-Format zu speichern, um eine möglichst große Kompatibilität verschiedener GIS-Software-Applikationen zu erreichen. [10][53]

### 2.3.3.2 Beispiel GIS-Web-Anwendung Energieatlas NRW

Als Beispiel einer GIS-Web-Anwendung dient hier der *Energieatlas NRW* des LANUV. Dieser stellt »umfangreiche Informationen zur Energiewende in Nordrhein-Westfalen zur Verfügung. In den Themenkarten sind landesweit verfügbare Planungsdaten veröffentlicht.« Unter dem Reiter Karten finden sich die Themenkarten *Biomassepotential, Planung Wind, Rheinisches Revier, Solarkataster, Strom Bestand* und *Wärmekataster*. [26]

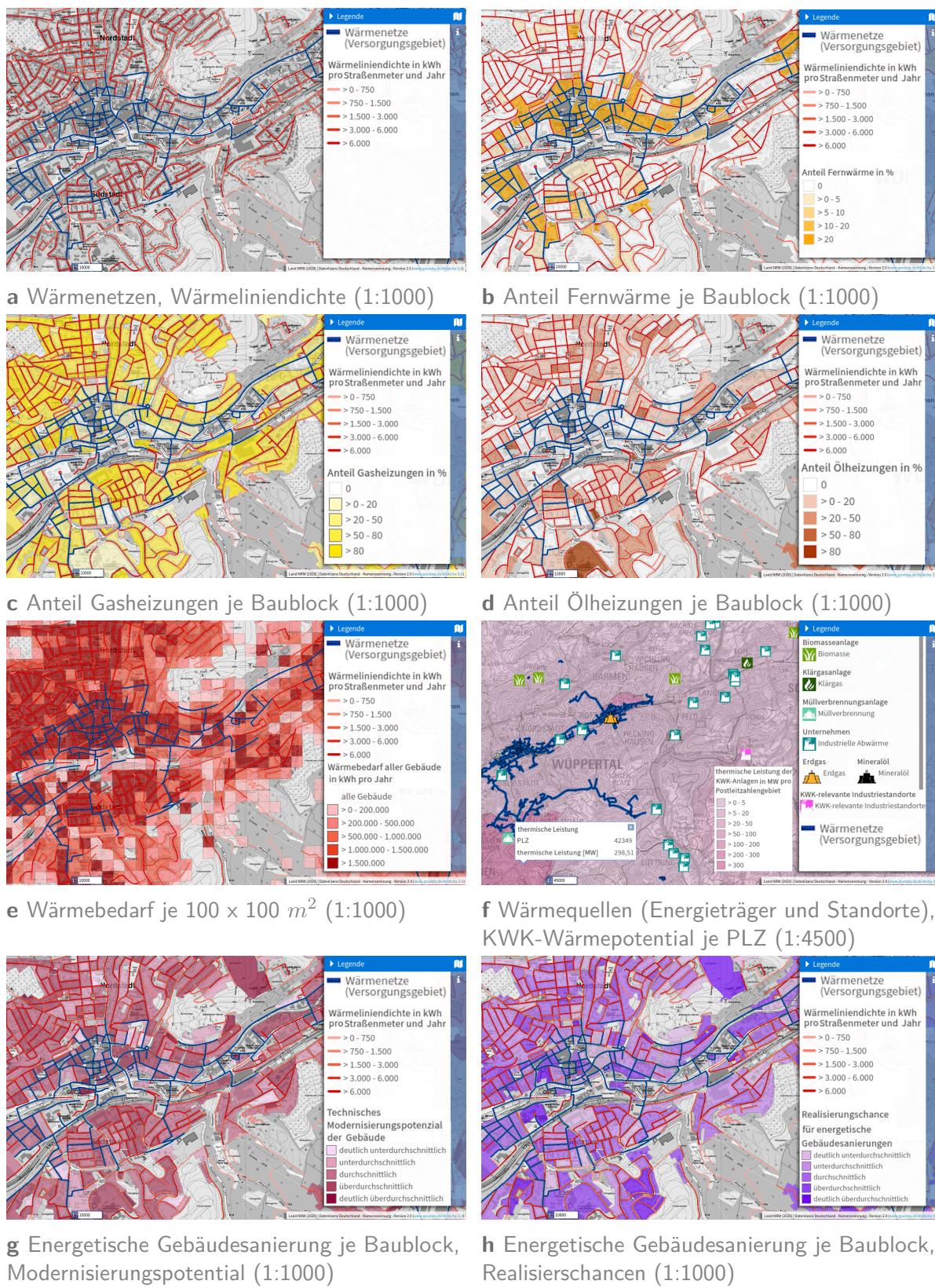
Abbildung 2.7 zeigt exemplarisch einige Darstellungsmöglichkeiten der Themenkarte *Wärmekataster* aus dem Energieatlas NRW, wie sie im Zuge von Wärmeplanungen genutzt werden können. Die gezeigten Wärmeliniendichte stammt aus dem Raumwärmeverbedarfsmodell des LANUV, die Daten für Heiztypen je Baublock sind abgeleitet aus den Daten des Zensus 2011. Die Standorte für Wärmequellen und KWK-Potentiale stammen aus einer Studie des LANUV. Die Daten zum Modernisierungspotential und die Realisierungschancen für energetische Sanierungen stammen aus Schätzungen des LANUV. [26]

In der Themenkarte *Solarkataster* des *Energieatlas NRW* sind unter Anderem geeignete Frei-

und Dachflächen für PV bzw. Solarthermie gezeigt. Geeignete Dachflächen für PV, die keiner Prüfung durch ein Fachunternehmen zur Eignung bedürfen, werden farblich nach Ausrichtung (Flach, Nord, Ost, Süd, West) differenziert markiert. PV-Eignungsflächen lassen sich nach EEG 2021 und nach EG 2023 anzeigen. Zudem enthalten sind Daten zur Globalstrahlung, Strahlungsintensität und Sonnenscheindauer. [26]

Die Themenkarte *Biomassepotential* des *Energieatlas NRW* zeigt Biomassepotentiale aus der Potentialstudie des LANUV für Strom oder Wärme aufgeteilt nach verschiedenen Szenarien (Minimum, Leit, Maximum) und Sektoren (Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Abfallwirtschaft, gesamt). Die Daten werden räumlich nur für ganz NRW aggregiert dargestellt. [26]

Weitere Beispiele für GIS-Web-Anwendungen sind zum Beispiel der *Zensusatlas* des Zensus 2011 von den Statistischen Ämtern des Bundes und der Länder (destatis) [90] und die interaktive Karte *Geothermie in NRW - Standortcheck* des Geologischen Dienstes NRW [33].



**Abbildung 2.7** Energieatlas NRW - Wärmekataster: Eigene Darstellungen, Legende editiert [26]

---

# 3 Datengrundlage

Für die Wärmewende ist eine detaillierte Datengrundlage essentiell, da sich nur mit umfangreicher Datenbasis optimal auf die jeweilige Region zugeschnittene Wärmewendestrategien entwickeln und umsetzen lassen. Hierfür bieten Wärmeplanungen einen holistischen Ansatz zur Strategie-Entwicklung, um der zunehmende Komplexität unserer Energie- und Wärmeinfrastruktur durch stetig wachsende Inter-Konnektivität der einzelnen Sektoren gerecht zu werden.

Im Zuge dieser Arbeit wird zur Erstellung einer geeigneten Datengrundlage eine Sichtung öffentlich verfügbarer Daten durchgeführt, welche daraufhin auf ihre Eignung hin bewertet und selektiert werden. Der Sichtungs-, Bewertungs- und Auswahlprozess für Daten wird im ersten Teil dieses Kapitels in Abschnitt 3.1 beschrieben. Eine detailliertere Beschreibung des Inhalts, des Formats, möglicher Anwendungsfelder und der Bewertung auf Eignung der ausgewählten Datensätze erfolgt im zweiten Teil dieses Kapitels in Abschnitt 3.2.

## 3.1 Sichtungsprozess und Daten-Aquise

Für die Auswahl von Datensätzen für eine geeignete Datengrundlage wurde zunächst eine Liste erstellt, welche Daten erforderlich für Wärmeplanungen sind. Die Zusammenstellung ist in Unterabschnitt 3.1.1 beschrieben und orientiert sich an den Prozessschritten von Wärmeplanungen.

Als nächsten Schritt wurden allgemeine Voraussetzungen und Bewertungskriterien definiert, um begutachtete Datensätze auf ihre Eignung für Wärmeplanungen zu bewerten. Die definierten Voraussetzungen und Bewertungskriterien finden sich in Unterabschnitt 3.1.2.

Daraufhin werden in Unterabschnitt 3.1.3 der eigentliche Sichtungsprozess beschrieben und mögliche Datenquellen aufgezählt, die im Laufe der Arbeit begutachtet wurden.

Zum Schluss wird das vorläufige Ergebnis der Sichtung in Kapitel Unterabschnitt 3.1.4 anhand einer Tabelle mit Gegenüberstellung von Anwendungszweck und jeweils nutzbarem Datensatz präsentiert.

### 3.1.1 Erforderlicher Daten

Um eine geeignete Datengrundlage für Wärmeplanungen zusammen zu stellen wurde zunächst eine Liste erforderlicher Daten zur Bestandsaufnahme, dem ersten Schritt einer Wärmeplanung, kreiert. Zur besseren Orientierung wurde eine grobe Unterteilung vorgenommen hinsichtlich Daten zur Gemeindestruktur und Daten zu Energie- bzw. eine daraus abgeleiteten Treibhausgas-Emissions-Bilanzen.

**Bestandsaufnahme-Daten umfassen z.B. Daten zu:**

- Gemeindestruktur
  - Kommunale Daten (Verwaltungsgrenzen, Population)
  - Gebäudebestand (Art, Alter, Dämmstandard, Population, Größe, Heizsystem)
  - Gebiets-Nutzungsart (Wohngebiet, Industrie, Gewerbe, etc.) (Flächennutzungspläne)

Netze, bestehend und geplant (Wärme, Gas, Glasfaser)

Schutzgebiete (z.B. Natur-, Landschafts-, Naturata2000-, FFH-, Vogel-, Wasser-Schutzgebiete)

- Energie- und THG-Emissions-Bilanz

- Erzeugungsdaten (nach Energieträger)

- Verbrauchsdaten (nach Energieträger / Sektor)

- THG-Emissionen (nach Energieträger / Sektor)

Im Zweiten Schritt der Wärmeplanung werden zur Erstellung einer Potentialanalyse Daten zu potentiellen Wärmequellen einer Region gesammelt. Zur Strukturierung bietet sich die Aufteilung nach Energieträgern an.

**Potentialanalyse-Daten umfassen z.B. Daten zu:**

- Potentiale zur Wärme-Erzeugung nach Energieträger

- Biomasse (nachwachsend, Klär-, Bio- oder Deponiegas)

- Geothermie (oberflächennah, (mittel-)tief, Grubenwasser)

- Solarthermie (Freiflächen, Dachflächen)

- Umwelt-Wärme (Oberflächenwasser, Luft)

- Abwärme (Industrie und GHD, Rechenzentren, Abwasser, Müllverbrennung, KWK-Anlagen, Power-to-X-Anlagen)

- Potentiale zur Strom-Erzeugung nach Energieträger

- Wind (onshore, offshore)

- PV (Freiflächen, Dachflächen)

- Wasser (Fließwasser-, (Pump-)Speicher-Kraftwerke)

Von weiteren Daten zur Aufstellung von Zielszenarien und Wärmewendestrategien, den Schritten drei und vier für Wärmeplanungen, wurde in dieser Arbeit aus Zeitgründen und dem geplanten Umfang der Arbeit abgesehen.

### **3.1.2 Vorraussetzungen und Bewertungskriterien**

Die Kriterien zur Bewertung der Eignung gesichteter Daten sind nach eigener Definition deren öffentliche Zugänglichkeit, inhaltlich u.A. deren Relevanz, Genauigkeit, räumliche Auflösung, ihr räumlicher Abdeckungsgrad, ihre Aktualität und prozesstechnisch deren Kompatibilität, Größe, Prozessierbarkeit und Performance bei der Verarbeitung je nach Formatierung. Relevanz in diesem Kontext bedeutet, dass die untersuchten Daten in einem der vier Wärmeplanungs-Prozessschritte verwendet werden können, also in der Bestandsaufnahme, Potentialanalyse, Szenarien-Entwicklung oder Wärmewendestrategie hilfreich sind.

In Bezug auf die Verfügbarkeit ist anzumerken, dass im Zuge dieser Arbeit wie im Themenblatt spezifiziert lediglich öffentlich zugängliche Daten ausgewertet wurden. Für konkrete

Wärmeplanungen haben Kommunen gegebenenfalls Zugang zu weiteren Daten. Dazu können kommuneninterne Daten gehören oder je nach Landesgesetzgebung beispielsweise auch gebäudescharfe Verbrauchsdaten von Versorgungsunternehmen wie in Baden-Württemberg.

Bezüglich der Auflösung von Daten sind für lokale Wärmeplanungen stets höchst mögliche Auflösungen vorzuziehen. Daten können beispielsweise gebäude-/anlagenscharf vorliegen oder aggregiert z.B. für Gitterzellen oder andere Gebietsunterteilung wie verwaltungstechnische Einheiten à la Gemeinden, Kreise, etc..

Im Idealfall liegen erforderliche Daten direkt in geeigneter Form vor. Andernfalls sollten sich vorliegende Daten zumindest dafür eignen, um Abschätzungen zu treffen, z.B. indem Rückschlüsse auf erforderlicher Daten getroffen werden können. Im Folgenden sind exemplarisch ein paar Beispiele genannt für geeignete Daten zur Prognose von Verbräuchen und verschiedener Potentiale. Die mögliche Eignung von Daten muss hierfür in jedem Fall einzeln bewertet werden.

Für Wärmeplanende ohne Zugriff auf direkt erhobene Verbrauchsdaten könnten sich beispielsweise Daten zum Gebäudebestand wie Gebäudegröße und -funktion für Verbrauchsabschätzungen eignen. Ähnliches gilt auch in Bezug auf die Abschätzung des Dämm- bzw. energetischen Modernisierungspotentials. Liegen keine Daten zu durchgeführten energetischen Modernisierungsmaßnahmen vor, bietet sich z.B. die Analyse der Altersstruktur des Gebäudebestandes als Indikator an. Für die Abschätzung des erschließbaren Potentials neuer Wärmequellen müssen in der Regel ohnehin Annahmen getroffen werden falls diese noch nicht in Studien vorgenommen wurden. Indikatoren für das Geothermiepotential können z.B. u.a. geologische Auswertungen wie die Wärmeleitfähigkeit, die Untergrundtemperatur und hydrogeologische Sensibilität sein oder für Solarpotentiale z.B. u.a. die Globalstrahlungsintensität, die durchschnittliche Sonnenschein-dauer, die Topographie, die Gebäudegeometrien vorhandener Gebäude und die Geometrie des Baumbestandes (aufgrund von möglicher Verschattung) sein.

### **3.1.3 Sichtungsprozess und mögliche Datenquellen**

Für die Sichtung der Datenquellen wurden im Zuge dieser Arbeit Leitfäden und Informationsplattformen mehrerer Landesbehörden herangezogen (BW [43], NRW [26], Niedersachsen [44]), eigene Recherchen durchgeführt und beispielhaft genannte Quellen für Geodaten meines Betreuers betrachtet.

Zu den untersuchten Portalen zur Akquirierung geeigneter Daten für Wärmeplanungen mit Geobezug wurden u.A. die Webpräsenzen der folgenden Institutionen betrachtet:

- *OpenGeodata.NRW* [75]
- Zensus2011, Mikrozensus [90]
- Marktstamm-Register [74]

Landesbehörden wie das LANUV und die KEA-BW haben bereits hervorragende Arbeit geleistet in der Aufbereitung von Daten für Wärmeplanung und Bereitstellung von Informationen zu deren Durchführung. Da in der Arbeit zwar bundesweit verfügbare Daten gesichtet wurden, aber der Fokus auf NRW gelegt werden sollte, wurden vielfach NRW spezifische Daten u.a. aus verschiedenen Studien des LANUV herangezogen.

Aufgrund des begrenzten Umfangs dieser Arbeit ist darauf hinzuweisen, dass keine umfassende Analyse zu sämtlichen verfügbaren Datenquellen durchgeführt werden kann. Für weitere Recherchen sei daher die Leitfäden der KEA-BW und der KEA-Niedersachsen verwiesen. Dort werden sowohl durch die Landesgesetzgebung für Gemeinden garantierte Datenquellen wie Verbrauchsdaten von Einwohner\*innen bei Energieversorgungsunternehmen und Schornsteinfeger\*innen (in BW) erwähnt, als auch öffentlich zugängliche Daten verschiedener Typen und Quellen aufgeführt. [43] [44]

Die umfangreichste in dieser Arbeit betrachtete und für Wärmeplanungen nützliche Datenquelle mit Geobezug für NRW bietet das Online-Portal *OpenGeodata.NRW* des Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen.

### 3.1.4 Überblick zu Datenquellen nach Anwendungsbereich

Um einen Überblick über gesichtete Datenquellen mit möglichen Anwendungsbereichen zu geben, wurde im Laufe des Sichtungsprozess eine Übersichtstabelle erstellt. Da bis zum Ende dieser Arbeit noch keine abschließende Sichtung für Potential-Daten vorgenommen werden konnte, sind in Tabelle 3.1 lediglich Datenquellen und mögliche Anwendungsbereiche für die Bestandsaufnahme von Wärmeplanungen gezeigt. Die Daten sind wie in Unterabschnitt 3.1.1 beschrieben untergliedert. Ausgegraute Datensätze wurden nicht verwendet.

	<b>Bestandsaufnahme-Daten</b>	<b>Beschreibung Inhalt / Merkmale</b>	<b>Abdeckung***</b>	<b>Auflösung</b>	<b>Datei-Format***</b>	<b>Urhebend</b>	<b>Quelle</b>	<b>KBS***</b>
Gemeindestruktur	Gemeinde AGS-/ARS-Gemeindenamen Digitale Verwaltungsgrenzen Amtliche Basiskarte (Raster) OSM-Basiskarte (Vektor) Bauleitpläne	Schlüssel-Namens-Zuordnung Land, Reg.bezirk, Kreise, Gemein. Gebäude, Straßen, Gewässer, etc. Gebäude, Straßen, Gewässer, Flächentyp etc. Gebietstyp (n. Flächennutzungsplan)	Bund NRW NRW Reg.Bzrk(+) NRW (unvollst.)	ohne Geometrie hoch; niedrig 1:5000, 1 qkm Kacheln hoch hoch	csv Shape(+) tiff Shape GeoPackage	BKG B.Reg.Köln B.Reg.Köln geofabrik** MHKBD NRW	GV-Isys [OG] [OG] [OG] [OG]	- 25832 25832 OSM 25832
Gebäude	Hausumringe Gebäude- oder Wohnungsbestand Einwohnung	AGS, OI, GFK, AKTUALITAE**** Anzahl*: Gebäude-Typ; Altersklasse; Heiztyp; Eigentum Einwohner*innen je Gitterzelle	Ganz NRW Bund Bund	hoch Gitter 100m(+) Gitter 100m(+)	Shape csv csv	ALKIS Zensus2011 Zensus2011	[OG] zensus zensus	25832 3035 3035
Netze	Bestehende Wärmenetze Andere Netze	In Planung von LANUV u. EVUs Gas, Wärme, Glasfaser (Plan, Ist)	- -	- -	-	LANUV -	n.v. n.v.	
Schutz- Gebiete	Natur-, Landschaftsschutz Vogelschutzgebiete Lebensraumtypen Wasserschutzgebiete	Natur- und Landschaftsschutzgebiete Vogelschutzgebiete FFH-Richtlinien (naturnahe Gebiete) Wasserschutzgebiete	NRW NRW NRW ?	hoch hoch hoch ?	Shape Shape Shape ?	LANUV [1] LANUV [1] LANUV [1] ?	[OG] [OG] [OG] ?	
Energie- und THG-Bilanz	Erzeugung Anlagen Standorte Anlagen Wärme aggregiert Strom-/Gaserzeugungsanlagen Beschluss, Proj. Wärmeversorg.	MastrID+LANUV-ID, Typ, Leistung Typ, Leistung (Strom, Wärme) Typ, Leistung, teilweise Ertrag Typ, Leistung (Strom, Wärme) ?	NRW NRW Bund ?	punktuell punktuell Gemeinde punktuell ?	Shape Excel, Geodatabase XML ?	LANUV LANUV [2] MaStR ?	[OG] [OG] MaStR ?	25832 25832
Verbrauch	Raumwärmebedarf (RWB) Jahres-Wärme-/Kälte-Bedarf, Ist & Prognose 2030, '40, '50 Strom-/Gasverbrauchsanlagen nach Energieträger	spez. Flächen-/Linien-Wärmebedarf Aggr.: Raumwärme-Warmwasser, Prozesswärme (<500°C), Kälte Typ, Leistung (Strom, Wärme) ?	NRW NRW Bund ?	Gebäude/Straßen Gemeinde punktuell ?	Shape, Geodatabase Excel, Geodatabase XML ?	LANUV LANUV [2] MaStR ?	[OG] [OG] MaStR ?	25832 25832
THG	Versch. Software-Tools	nach Energieträger / Sektoren	Gemeinde	Gemeinde	-	versch.	s. [3]	

Abkürzung: n.v. = nicht verfügbar (Stand 2022)

Anmerkung: \*Merkmale einzeln Gitterzellen zugeordnet, aber nicht verknüpft

\*\* (+) bedeutet auch größere Abdeckungen oder weitere Datei-Formate

\*\*\* Kordinaten-Bezugssystem (KBS) nach EPSG Kodierung

\*\* Auszüge von OpenStreetMap Daten

\*\*\*\* OI: Objektidentifikator (ID), GFK: Gebäude- und Bauwerksfunktion (300+ Def.)

Fußnoten: [OG] OpenGeodata.NRW

[1] Teil der Landschaftsinformationssammlung (LINFOS) des LANUV

[2] Energieträger: Biomasse, Deponiegas, Grubengas, Klärgas, PV-Freifläche, Wasserkraft, Wind, WEA (Planung), WEA (stillgelegt), E-Tankstellen, ...

[2] Braun-, Steinkohle, Erdgas, Mineralöl, Sonst., MVA, Grubenwasserschächte und -projekte, Indust. Abwärme, KWK relevante Industriestandorte

[3] z.B. Klimaschutzblauer (Klima-Bündnis, ifeu-Institut, Institut dezentrale Energietechnologien), ECOSPEED Region (ECOSPEED AG)

**Tabelle 3.1** Anwendungsfälle und Datenquellen im Überblick

## 3.2 Datensätze-Beschreibung

In diesem Teil des Kapitels werden die ausgewählten Datensätze der Reihe nach näher beschrieben und u.A. Informationen zu Aktualität, Auflösung, Genauigkeit, Metadaten, Speicherformat und Größe gegeben.

### 3.2.1 Gemeindeverzeichnis-Informationssystem (GV-ISys)

Für die systematische Erstellung einer Datengrundlage für Wärmeplanungen in einem bestimmtem Gebiet ist eine Zuordnung von Daten zu Gemeinden bzw. deren zugehörigen Amtlichen Gemeinde- oder Regionalschlüsseln (AGS, ARS) hilfreich. Das Gemeindeverzeichnis-Informationssystem GV-ISys wird seit 2007 von den Statistischen Ämtern des Bundes und der Länder geführt.

Es enthält die komplette regionale Gliederung des deutschen Verwaltungsaufbaus. Für jede politische selbstständige Gemeinde werden unter anderem die folgenden Merkmale angegeben[37]:

- Amtlicher Gemeindeschlüssel (AGS)
- Amtliche Gemeindebezeichnung
- Einwohner\*innen (insgesamt/männlich/weiblich)
- Fläche in [ $m^2$ ]
- Postleitzahl für den Sitz der Gemeindeverwaltung

Der 8-Ziffern lange Amtliche Gemeindeschlüssel (AGS) wird abgeleitet aus dem Amtlichen Regionalschlüssel (ARS). Beide Schlüssel bieten eine eindeutige Zuordnung eines Verwaltungsgebiets auf jeder verwaltungs-technischen Hierarchie-Ebene. Beim AGS stehen die folgenden mit eckigen Klammern bezeichneten Ziffern für die jeweilige Regionaleinheit: [1-2] Bundesland, [3] Regierungsbezirk (falls vorhanden, sonst '0'), [4-5] Landkreis oder kreisfreie Stadt und [6-8] Gemeinde (bei kreisfreien Städten '000'). Wuppertal besitzt als kreisfreie Stadt im Regierungsbezirk Düsseldorf in Nordrhein-Westfalen beispielsweise den AGS 05 1 24 000, hier zur besseren Kennzeichnung mit Leerzeichen zwischen den Regionaleinheiten. Der ARS beinhaltet im Vergleich zum AGS einen zusätzlichen vier-ziffrigen Zahlenblock für die Kennzeichnung eines ggf. bestehenden Gemeindeverbandes unterhalb der Kreisebene. Die Ziffern sind dementsprechend sortiert: [4-5] Kreis, [6-9] Gemeindeverband und [10-12] Gemeinde. [35][36]

Ein Verzeichnis aller politisch selbstständigen Gemeinden mit ausgewählten Merkmalen (s.o.) wird über die Webseite des statistischen Bundesamtes als Excel-Datei angeboten und quartalsweise aktualisiert. Neben dem spaltenweise für jede Regionaleinheit angegebenen ARS, der Gemeindebezeichnung, Einwohner\*innenzahl, Fläche ist auch der jeweilige geographische Mittelpunkt angegeben. [32]

Für eine automatische Zuordnung von AGS und Gemeindenamen ist das Verzeichnis hilfreich, alternativ bieten sich zur manuellen Zuordnung auch diverse Online-Tools an.

## 3.2.2 Digitale Verwaltungsgrenzen NRW [BKG]

Auch wenn Wärmepläne nicht an kommunale Grenzen gebunden sind, erleichtert die Zuordnung der untersuchten Gebiets-Areale zu einzelnen Gemeinde-Gebieten eine weitere Eingrenzung und Referenzierung erfassster Daten. Das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie bietet die Geometrie-Daten für die Grenzen aller nordrhein-westfälischen Verwaltungsgebiete über OpenGeodata.NRW an. [75, s. /produkte/geobasis/vkg/dvg/]

Die Daten sind in zweifacher Auflösung (mit hoher oder niedriger Stützpunktdichte) als shape Files, TIFF Dateien und textbasiert in ASCII-Format verfügbar. Abgedeckt werden die Verwaltungsgrenzen für das Bundesland, alle Regierungsbezirke, Kreise und Gemeinden. Jeder Eintrag in den Datensätzen beinhaltet Einträge zur Art der Verwaltungsebene, dem Amtlichen Gemeindebezeichnung, einer Kennnummer (AGS) und dem Stand der Daten. Das Koordinatenreferenzsystem ist EPSG:25832.

Die Daten eignen sich zum Einen für die Darstellung von Verwaltungsgrenzen, zum Anderen eignen sich die vektorbasierten shape files gut zur Eingrenzung anderer Datensätze auf ausgewählte Gemeindegebiete.

## 3.2.3 Amtliche Basiskarte (ABK) (Raster-Graphik)

Für Base-Layer in einem GIS sind u.A. die Darstellung von Gebäuden, Straßenzügen, Gewässern, Landwirtschafts-, Wald- und anderen Grün-Flächen und gegebenenfalls der Topographie durch Höhenlinien hilfreich. Die Amtlichen Basiskarte (ABK) stellt diese Merkmale dar und dient laut Bezirksregierung Köln als topographisches Basiskartenwerk. Sie soll die Schnittstelle zwischen eigentumsorientierter Liegenschaftskarte und topographischen Landeskartenwerken sein. Abgedeckt wird der gesamte Raum Nordrhein-Westfalens. [75, s. /produkte/geobasis/lk/akt/abk\_tiff/][8]

Die Amtlichen Basiskarten liegen in Schwarz-/Weiß- oder Farbausprägung als Raster Graphiken mit 1:5000 Maßstab für NRW unterteilt in quadratische 1 km<sup>2</sup> Kacheln mit dem Dateiformat .tiff vor. Allein für NRW ergeben sich daraus in etwa 35.000 Einzel-Kacheln respektive Dateien mit einer Größe von jeweils 74 kB in farbiger Ausprägung (ca. 7,8 MB gesamt). Das KBS ist ETRS89/UTM32 (EPSG:25832). [75]

Die Amtliche Basiskarte eignet sich gegebenenfalls zur Visualisierung von lokalen Gegebenheiten, hat aber den großen Nachteil nicht vektorbasiert zu sein, sodass sie sich kaum zur Weiterverarbeitung oder zur Verknüpfung mit weiteren Datensätzen eignet. Die Menge an Dateien würde zur Reduzierung auf ein gesuchtes Areal eine Vorauswahl nach Kachel-ID erfordern.

Als Alternative zur ABK kann das Kartenmaterial des OpenStreetMap-Konsortiums dienen.



**Abbildung 3.1** Beispiel Ausschnitt Amtlicher Basiskarte (farbig und schwarz-weiß) [8]

### 3.2.4 OpenStreetMap (OSM) Basiskarte (Vektor-Graphik)

Um für Base-Layer wichtige topologische Merkmale wie Stadt- und Verkehrsinfrastruktur (u.A. Gebäude, Straßen, Schienen), landschaftliche Merkmale (z.B. Gewässer, Felder, Wälder, Wiesen) und mehr darzustellen bieten sich neben der ABK auch das OpenStreetMap Kartenwerk an. OSM ist ein 2004 gegründetes Projekt mit dem Ziel freies Kartenmaterial oder im Allgemeinen Geoinformationen zu erstellen und stellt diese Daten seit 2012 unter der *Open Database Licence (ODbL) 1.0* bereit. [76]

Da die Daten von Freiwilligen weltweit gesammelt, überprüft und aktualisiert werden ist die Menge, Korrektheit und Genauigkeit erfasster Merkmale regional unterschiedlich und in keinster Weise rechtlich garantiert. Sowohl aus eigener Erfahrung als auch, was die Aktivität und Anzahl an Commits innerhalb der OSM-Community angeht lässt sich sagen, dass der Detailgrad innerhalb Deutschlands flächendeckend sehr hoch ist und alle der erwähnten Merkmale abdeckt. OSM-Daten finden daher auch in einer Vielzahl an Applikationen Anwendung. [76]

Das OpenStreetMap-Wiki bietet eine gute Übersicht der erfassten Objekte im OSM-Datensatz und die verwendeten Tags zur Kennzeichnung bestimmter Merkmale (z.B. Straßentyp oder Typ der Landnutzung). Für eine Darstellung in QGIS bedarf es hierfür Style-Definitionen, um verschiedene Merkmale differenziert anzeigen zu können. QGIS selbst bietet hierfür keine standardmäßig verwendeten Style-Definitionen. Auch über die OSM-Webseite sind solche Styles für QGIS nicht verfügbar. [51]



a Eigener Layer Style ("quick and dirty")

b Style von champs-libres [18]

**Abbildung 3.2** Beispiel OSM Darstellung in unterschiedlichen QML Styles

Als gute Basis für eine Style-Definition haben sich die OSM-Styles von champs-libres herausgestellt, insbesondere für die Darstellung von Straßenzügen nach Typ (Autobahn, Bundesstraße, Landstraße, etc.) und Gebieten nach Typ der Landnutzung (z.B. Wohn-, Industrie-, Wald-, Wiesengebiete und Tagebaue). Eine Beispiel-Darstellung eines Kartenausschnitts mit eigenen Layer-Styles (quick and dirty) und denen von champs-libres sind zum Vergleich in Abbildung 3.2 gezeigt. Einige Symbole, beispielsweise bei der Anzeige von Friedhöfen (in der Abbildung am

unteren Bildrand) oder Tagebauen wurden allerdings in der aktuellen Version von QGIS nicht korrekt dargestellt. Zur Korrektur bietet sich eine manuelle Nachbearbeitung in QGIS an. [18]

Das OSM Kartenmaterial kann entweder als sogenanntes planetfile für den gesamten Globus direkt von den Servern einer englischen Universität heruntergeladen werden oder über Drittanbieter wie z.B. der Geofabrik GmbH Karlsruhe. [76][71]

Geofabrik bietet extracts des OSM planetfiles an, untergliedert nach Kontinent, Staatsgebiet und innerhalb Deutschlands weiter unterteilt in ganze Bundesländer oder den jeweiligen Regierungsbezirken (falls vorhanden). Die Daten werden komprimiert (als .osm.pbf, .shp.zip und .osm.bz2) zum Download angeboten und liegen dekomprimiert wahlweise in den Dateiformaten .osm oder .shp vor. Die Endung .pbf, .zip und .bz2 sind stehen für angewandte Komprimierungsformate. [71]

Für den Regierungsbezirk Köln ist das Shape File entpackt in etwa 1,2 GB groß, wovon knapp 700 MB allein auf Gebäude entfallen (ca. die Hälfte für die Database und die Hälfte für das .shp file). Es finden sich insgesamt 18 Layer. Die neun wichtigsten für Wärmeplanungen und im Laufe dieser Arbeit verwendeten Layer (in top-down Reihenfolge) sind *osm\_buildings\_free\_1* (optional für Gebäude), *osm\_railways\_free\_1* (für Schienen), *osm\_roads\_free\_1* (für Straßen und Wege), *osm\_landuse\_free\_1* (für Flächennutzungstypen), *osm\_places\_free\_1* (z.B. für Ortsbezeichnungen), *osm\_pois\_a\_free\_1* (Point of Interest Flächen, z.B. für Schulgelände oder Kläranlagen-Gelände, die nicht über das Landuse-Layer abgedeckt sind) *osm\_traffic\_a\_free\_1* (z.B. für Parkflächen und -gebäude), *osm\_water\_a\_free\_1* (z.B. für Seen und Teiche) und *osm\_waterways\_free\_1* (für Wasserläufe).

Das KBS wird in QGIS durch die .proj Dateien automatisch erkannt und entspricht EPSG:4326.

Der hohe Detailgrad und die freie Lizenz machen die OSM-Karten zu einem geeigneten Basis-Kartenwerk. Da das.osm Dateiformat OSM-eigen ist und außerhalb kaum Anwendung findet und sich auch erst nach Konvertierung in QGIS nutzen lässt, bieten sich besonders die .shp Files an. Für konkrete Wärmeplanungen in einer Kommune können zur Überprüfung zusätzlich zum Beispiel registergestützte Daten wie die Hausumringe aus dem Amtlichen Ligenschafts-Kataster (ALKIS) herangezogen werden.

### **3.2.5 Schutzgebiete der Landschaftsinformationssammlung (LINFOS) [LANUV]**

Über die Plattform *OpenGeoData.NRW* bietet das LANUV zum Download Schutzgebiete verschiedener Art als Teil der Landschaftsinformationssammlung (LINFOS) zum Download an. [75]

Die Schutzgebiete umfassen unter anderem FFH-, Landschaftsschutz-, Naturschutz-, Nationalpark-, Naturpark-, Vogelschutzgebiete sowie RAMSAR-Schutzgebiete für Feuchtgebiete. Nicht enthalten sind allerdings Wasserschutzgebiete. Die Vollständigkeit der Daten konnte aus Zeitgründen nicht näher untersucht werden. LINFOS ist eine unter mehreren Sammlungen von Schutzgebieten, welche über *OpenGeoData.NRW* zum Download angeboten werden.

Die Daten liegen alle als zip-komprimierte Shape-Files vor, wobei für jede Art von Schutzgebiet ein seperater Datensatz als Zip-Archiv vorliegt. Die Datensätze enthalten überwiegend je ein Shapefile, in manchen Fällen jedoch mehrere. Die Shapefiles sind etwas kryptisch benannt und

werden mit polygon-, polyline- oder pointproved im Dateinamen gekennzeichnet.

Der Datensatz wurde erst gegen Ende dieser Arbeit begutachtet und wird aus Zeitgründen nicht näher untersucht.

### 3.2.6 Hausumringe im Amtlichen Liegenschaftskataster-Informationssystem [ALKIS]

Die Hausumringe im ALKIS-Datensatz geben die Geometrie von über 10 Mio. Gebäudegrundrisse in NRW wieder. Sie stammen von den 53 Katasterbehörden in NRW, werden von der Bezirksregierung Köln, Geobasis NRW bereitgestellt und sind über OpenGeodata.NRW verfügbar. [75]

Der Datensatz für Hausumringe folgt dem ALKIS-Standard, welcher bundesweit einheitlich ist. Die Objekte enthalten zusätzlich zur Geometrie der Grundrisse die folgenden Attribute: Amtlicher Gemeindeschlüssel (AGS), Objektidentifikator (OI), Gebäude-/Bauwerksfunktion (GFK), Aktualitätsdatum (AKTUALITAE). Nicht enthalten sind Ausgestaltungsgeometrie und Dachform.

Die Hausumringe liegen als Shape-File mit einer Größe von ca. 2,5 GB vor. Die Einträge für die Gebäude- und Bauwerksfunktion in der Database liegen codiert vor, z.B. '31001\_1000' für 'Wohngebäude'. Die Zuweisung von Codes zu Beschreibungstext ist in Form einer .xml-Datei gegeben. Insgesamt liefert diese nach eigener Auswertung 301 Definitionen für Gebäude- bzw. Bauwerksfunktionen. [23]

Das KBS ist EPSG:25832 (ETRS89/UTM32)

Die Hausumringe des ALKIS eignen sich zur Darstellung von Gebäuden, optional mit Gebäudefunktions-Bezeichnungen oder Einfärbung je nach Gebäudefunktion. Im Zuge dieser Arbeit verwendet wurden nur die ALKIS-Daten für NRW. Seit Dezember 2015 ist das ALKIS laut Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) aber in allen Bundesländern eingeführt, wodurch die Hausumringdaten diesen Formats bundesweit verfügbar sind. [70]

### 3.2.7 Gebäude- und Wohnungsbestand [Zensus2011]

Im Zuge der Volkszählung 2011 in der Europäischen Union wurde in Deutschland der Zensus 2011 zur Datenerhebung durchgeführt. Gesetzliche Basis in Deutschland für die registergestützte Datenerhebung ist das bundesdeutsche Zensusgesetz 2011 mit welcher die EG-Verordnung 763/2008 umgesetzt wurde, welche eine Datenerhebung alle 10 Jahre vorsieht. Das Gesetz definiert den Stichtag (9. Mai 2011), die Erhebungsmerkmale (u.A. Alter, Geschlecht, Schulabschluss, Wohnfläche, etc.) und die Auskunftspflichtigen. Im Zuge des Zensus wurden neben Daten zur Population auch umfassend Daten zum Gebäude- und Wohnungsbestand erhoben.

### 3.2.7.1 Potentieller Nutzen und Vollständigkeit

Für Wärmeplanungen können die Daten zum Gebäude- und Wohnungsbestand zur Bestandsaufnahme nützlich sein. Die Anzahl, Größe und das Alter von Wohnungen bietet sich als Indikator für Sanierungspotential von Gebäuden an. Bereits durchgeführte Sanierungsarbeiten werden zwar nicht zentral erfasst, aber in Gebieten mit einer hohen Dichte von Altbauten und Population ist sowohl das Sanierungspotential als auch i.d.R. der spezifische Wärmeverbrauch je Wohnfläche größer.

Die Daten des Zensus 2011 stellen zum Zeitpunkt dieser Arbeit die aktuelle Zensus-Datenbasis, da die Ergebnisse der Folge-Zählung Zensus 2022 vorraussichtlich erst 2023 veröffentlicht werden. Neben dem umfangreichen Datenangebot für aggregierte Werte für Kommunen, Kreise, Länder und Bund bietet die Zensus-Datenbank auch gitterzellenbasierte Datensätze für Gebäude und Wohnungen an, welche in einem INSPIRE-kompatiblen 100m x 100m Raster vorliegen. Letztere sollen aufgrund ihrer höheren Auflösung näher untersucht werden.

Die Zensus-Datenbank bietet in Deutschland hinsichtlich Gebäudebestand die umfangreichste und flächendeckendste Datenbasis, da sie gesamte Bundesgebiet abdeckt. Aus Datenschutzgründen wurden die originalen Ergebnisse des Zensus geheim gehalten. Die Genauigkeit von aggregierten Werten, Verhältniszahlen, Anteilen und Durchschnittswerten ist davon nicht betroffen, da diese aus den originären Werten abgeleitet wurden. Für die veröffentlichten Raster-Werte ist anzumerken, dass diese aufgrund der angewandten datenverändernden Verfahren zur statistischen Geheimhaltung bei zu geringen Werten nur eingeschränkt verlässlich sind. Das Statistische Bundesamt gibt einen Grenzwert von etwa 10 und weniger an, ab wann das Risiko relativer Abweichungen von mehr als 50 Prozent vom tatsächlichen Wert besteht. Hierfür enthält der Datensatz zu jedem Eintrag eine Geheimhaltungskennzeichnung, welche angibt ob es vor und nach Geheimhaltung keine bis geringe, starke oder inakzeptable Abweichungen ergeben. Gitterzellen mit nur einer Person werden zudem wie Gitterzellen ohne Person klassifiziert und Gitterzellen mit zwei Personen wie Gitterzellen mit 3 Personen.

Da geheimhaltungsbedingte Abweichungen nur bei niedrigen Raster-Werten auftreten und auch nur je Gitterzelle, für Wärmeplanungen i.d.R. aber Gebiete mit hoher Populations- und Wohnungsdichte relevant sind und zudem größere Gebiete betrachtet werden, in welchen die Abweichungen sich im Mittel wieder zum Teil ausgleichen, wird im Zuge dieser Arbeit die Genauigkeit und Vollständigkeit diesbezüglich als hinreichend erachtet.

### 3.2.7.2 Inhalt gitterzellbasierter Zensus-Daten (Gebäude, Wohnungen)

In der gebündelten Datensatzbeschreibung der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder für die beiden Zensus 2011 Datensätze für Gebäude und Wohnungen wird aufgeführt, welche Merkmale erfasst werden und welche Ausprägungen diese haben können. Zu den Merkmalen gehören die Gesamtzahl, Gebäudeart, Gebäudebauweise, Gebäudegröße, Wohneigentum, Eigentum, Nutzung nach Belegung durch Haushalt, Heiztyp, Wohnfläche, Baujahr, Raumanzahl und Zahl der Wohnungen. Zum Beispiel gibt es für das Merkmal *Heiztyp* u.A. die Ausprägungen *Fernheizung* (*Fernwärme*), *Etagenheizung* und *Zentralheizung* und für das Merkmal Baujahr entsprechen die Ausprägungen den im Mikrozensus verwendeten Baualters-Klassen, z.B. *Vor 1919, 1919 -*

1948, usw.. Manche Merkmale wie z.B. die Wohnungsgröße finden nur im Wohnungs-Datensatz Anwendung.

Die zu jedem Merkmal erfassten Ausprägungen, sind sowohl als Zahlencode als auch in Textform (deskriptiv) hinterlegt. Tabelle 3.2 zeigt beispielhaft eine Liste an Merkmalen und zugehörigen Ausprägungen für den Wohnungs-Datensatz, welche zur Bestandsaufnahme betrachtet werden können.

INSGESAMT [1]		Legende		BAUJAHR_MZ [5]	
		Merkmal	_Code	Ausprägung_Text	
0	Einheiten insgesamt				1 Vor 1919
1	Von Eigentümer/-in bewohnt	WOHNFLAECHE_10S [4]	01	Unter 30	2 1919 - 1948
11	Eigentum: mit aktuell geführtem Haushalt		02	30 - 39	3 1949 - 1978
12	Eigentum: ohne aktuell geführtem Haushalt		03	40 - 49	4 1979 - 1986
2	Zu Wohnzwecken vermietet		04	50 - 59	5 1987 - 1990
21	Vermietet: mit aktuell geführtem Haushalt		05	60 - 69	6 1991 - 1995
22	Vermietet: ohne aktuell geführtem Haushalt		06	70 - 79	7 1996 - 2000
3	Ferien- und Freizeitwohnung		07	80 - 89	8 2001 - 2004
4	Leer stehend		08	90 - 99	9 2005 - 2008
5	Diplomaten-/Streitkräftewohnung		09	100 - 109	10 2009 und später
99	Gewerbl. Nutzung		10	110 - 119	
			11	120 - 129	
			12	130 - 139	
			13	140 - 149	
			14	150 - 159	
			15	160 - 169	
			16	170 - 179	
			17	180 und mehr	
			99	t.n.z., gewerblich	
Weitere Merkmale:					
GEBAEUDEART_SYS					
GEBTYPBAUWEISE					
GEBTYPGROESSE					
WOHNEIGENTUM					
RAUMANZAHL					
EIGENTUM					
ZAHLWOHNGN_HHG					

Erläuterungen	
[1] Gesamtzahl der Einheiten in der Gitterzelle	Kann aufgrund der Geheimhaltung von der Summe über alle Ausprägungen der anderen Merkmale abweichen
[2] Nutzung nach Belegung durch Haushalt	[4] Fläche der Wohnung (10m <sup>2</sup> )
[3] Heizungsart	[5] Baujahr (Mikrozensus-Klassen)

**Tabelle 3.2** Liste von Merkmalen und Ausprägungen im Zensus 2011 Datensatz zu Wohnungen und Gebäude im 100m Gitterraster

Aus den Datensätzen lässt sich direkt entnehmen, wie viele Gebäude oder Wohnungen beispielsweise über eine Zentralheizung verfügen, wie viele Wohnungen einer bestimmten Wohnflächen-Kategorie oder einer Altersklasse vorhanden sind, ebenso die Leerstandsquote. Die Anzahl wie oft Ausprägungen von Merkmalen auftreten wird dabei isoliert von einander angegeben. Eine direkte Verknüpfung von Merkmalen lassen die Datensätze im Allgemeinen nicht zu. Wenn es beispielsweise Wohnungen gibt mit unterschiedlichen Heiztypen und die Wohnungen aus verschiedenen Altersklassen stammen, lässt sich nicht ableiten, wie oft, welcher Heiztyp in Wohnungen einer bestimmten Altersklasse vorhanden ist.

### 3.2.7.3 Format gitterzellenbasierter Zensus-Daten (Gebäude, Wohnungen)

Beide Datensätze sind in tabellarischer Form als csv Datei verfügbar mit 8 Spalten für einen Index, die Gitter-ID (in zwei Schreibweisen), die Ausprägung (als Code und als Text), die Anzahl und die Qualitätsgüte.

Der Index ist eine eindeutige Identifikationsnummer, die Gitter-ID gibt die Koordinaten des südwestlichen Eckpunkts einer Gitterzelle an. Merkmal und Ausprägung geben in jeder Zeile an, welche Größe in der Spalte Anzahl quantitativ erfasst wurde. Die Qualitätsgüte gibt an, ob die angegebene Anzahl aufgrund der angewandten geheimhaltungsbedingten datenverändernden Verfahren nicht bis wenig (0), stark (1) oder inakzeptabel (2) vom ursprünglichen Wert abweicht.

Gitter_ID_100m	Merkmal	Code	Text	Anzahl	q	Anzahl	q
100mN31153E41077	INSGESAMT	0	Einheiten insgesamt	14	0	40	0
100mN31153E41077	BAUJAHR_MZ	1	Vor 1919	3	0	3	0
100mN31153E41077	BAUJAHR_MZ	3	1949 - 1978	5	0	8	0
100mN31153E41077	BAUJAHR_MZ	4	1979 - 1986	3	0	24	0
100mN31153E41077	BAUJAHR_MZ	9	2005 - 2008	3	0	3	0
100mN31153E41077	HEIZTYP	2	Etagenheizung	3	0	3	0
100mN31153E41077	HEIZTYP	4	Zentralheizung	12	0	37	0
100mN31153E41077	NUTZUNG_DETAIL_HH	11	Eigentum: mit aktuell geführtem Haushalt			12	0
100mN31153E41077	NUTZUNG_DETAIL_HH	21	Vermietet: mit aktuell geführtem Haushalt			25	0
100mN31153E41077	NUTZUNG_DETAIL_HH	22	Vermietet: ohne aktuell geführtem Haushalt			3	0
100mN31153E41077	WOHNFLAECHE_10S	3	40 - 49			16	0
100mN31153E41077	WOHNFLAECHE_10S	4	50 - 59			8	0
100mN31153E41077	WOHNFLAECHE_10S	5	60 - 69			3	0
100mN31153E41077	WOHNFLAECHE_10S	6	70 - 79			3	0
100mN31153E41077	WOHNFLAECHE_10S	9	100 - 109			7	0
100mN31153E41077	WOHNFLAECHE_10S	12	130 - 139			3	0

**Tabelle 3.3** Darstellung der Daten einer Gitterzellen aus dem Zensus-Datensatz für Gebäude und Wohnungen. Spalten für Zeilen-ID und Gitter\_ID\_100m\_neu sowie Zeilen bestimmter Merkmale entfernt. (Blaugrün mit Blau ohne Grün: Gebäudedatensatz, Blaugrün mit Grün ohne Blau: Wohnungsdatensatz)  
Geänderte Spaltenbezeichnungen: Ausprägung\_Code: Code, Ausprägung\_Text: Text, Anzahl\_q: q

Tabelle 3.3 zeigt exemplarisch die Werte einiger Merkmale beider Datensätze für die selbe Gitterzelle zum Vergleich. Abzulesen ist beispielsweise, wie viele Wohnungen einer bestimmten Altersklasse auf wie viel Gebäude aufgeteilt sind. Ebenso lässt sich ablesen, dass 3 der 40 Wohnungen derzeit unbewohnt sind. Bei Betrachtung der Heiztyp-Angaben zeigt sich, dass sich 37 mit Zentral- und 3 mit Etagenheizung beheizte Wohnungen auf je 12 bzw. 3 Gebäude aufteilen. Von den 3 Gebäuden mit Etagenheizung müssten 2 über unbeheizte Etagen und das dritte zusätzlich über eine Zentralheizung verfügen. Bemerkenswert ist zudem noch, dass in dieser Gitterzelle zwar alle 14 Gebäude, aber nur 38 der 40 Wohnungen mit Altersklasse erfasst sind. Dies ließe sich nur durch geheimhaltungsbedingte Nicht-Erfassung erklären, wenn beide Wohnungen aus zwei von einander und von allen anderen Wohnungen unterschiedlichen Altersklassen stammen, z.B. durch Zu- bzw. Anbau oder durch Ungenauigkeit der Daten.

Die Gitter-Geometrie ist INSPIRE-kompatibel mit KBS(CRS) ETRS89-LAEA Europe -

EPSG:3035 und die Daten liegen als .csv-Dateien mit UTF-8 Codierung in einer Größe von 2,0 GB (für Gebäude) bzw. 4,3 GB (für Wohnungen) vor.

### 3.2.7.4 Bewertung auf Eignung

Die Daten des Zensus zum Wohnungs- und Gebäudebestand besitzen einen hohen Grad an Repräsentativität, bieten inhaltlich relevante Informationen für Bestandsaufnahmen durch die Erfassung von Bau-Altersklassen, Wohnflächengrößen, Heiztypen und Nutzungsart (inkl. Leerstandsquote), decken räumlich das gesamte deutsche Bundesgebiet ab, besitzen eine relativ hohe räumlichen wie inhaltliche Auflösung mit (100 m x 100 m) Gitterzellen und der vergleichsweise feinen Staffelung bezüglich Wohnungsgröße und Altersklassen sowie relativ hohe Aktualität mit Stand der Daten von 2011.

Die Schwierigkeit bei der Auswertung der Zensus2011 Daten zu Wärmeplanungszwecken ergibt sich aus dem Umstand, dass die untersuchten Merkmale zwar gebäude- bzw. wohnungsscharf erhoben wurden, aber aus Datenschutzgründen nicht in vollem Umfang merkmalsverknüpft in dieser Auflösung öffentlich verfügbar sind. Die erfassten Merkmale spiegeln somit energetische Einzelaspekte (wie z.B. Altersklassen und Größe), lassen sich aber nicht direkt zu gesamtenergetischen Bewertungen zusammenfügen.

Eine Verschmelzung mit anderen Datensätzen wie z.B. über die Häufigkeit verschiedener Dämmstandards je Altersklassen ist zwar möglich, allerdings ist zu beachten, dass solche Synthese-Datensätze einer statistischen Ungenauigkeit unterliegen, was mit einem zusätzlichen Unsicherheits-Faktor zu berücksichtigen wäre. Zudem entstünden fiktive Gebäude bzw. Wohnungen, die nicht unbedingt die realen Verhältnisse widerspiegeln.

Auf diese Problematik, was die begrenzte Verknüpfbarkeit einzelner für sich genommen valider und statistisch belastbarer Informationen angeht wird auch in anderen Untersuchungen zum deutschen Wohnungsbau bestätigt hingewiesen. Vergleich [Cischinsky, Diefenbach 2018]

Dennoch Stellen die Zensus-Daten zum Gebäude und Wohnungsbestand für sich bereits wertvolle Informationen für Wärmeplanungen bereit. Größenbedingt ist zur besseren Verarbeitbarkeit zum Einsatz in Wärmeplanungen eine Reduktion der Datensätze auf eine gewünschte Region und zu untersuchende Merkmale angeraten, was beim vorliegenden Dateiformat mit überschaubarem Arbeitsaufwand machbar scheint.

### 3.2.8 INSPIRE Daten und Dienste [BKG]

Die Direktive Infrastructure for spatial information in Europe (INSPIRE) der Europäischen Union zielt darauf ab eine Infrastruktur für Geodaten zu erstellen. INSPIRE soll das Teilen von umweltbezogener Geodaten zwischen Organisationen des öffentlichen Sektors ermöglichen, den öffentlichen Zugang zu Geodaten in ganz Europa erleichtern und grenzüberschreitende Strategie-Entwicklungen unterstützen. [73]

Das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) bietet auf deren Website einige INSPIRE-konforme Dienste an. Zu diesem INSPIRE-Angebot gehören beispielsweise Geographische Bezeichnungen, Gewässernetze, Bodenbedeckung, Schutzgebiete, Transportnetze, Verwaltungseinheiten, Höhenmodelle und statistische Einheiten. Die angebotenen Dienste lassen sich via

URL in ein GIS einbinden. Allerdings werden die Daten nicht direkt für eine offline-Nutzung zum Download angeboten. In der Open Data Sektion finden sich weitere Datensätze, u.a. aufbereitete Satellitenfotos als Mosaik aus dem Erdbeobachtungsprogramm Copernicus (Sentinel-2, L1C und L2A) für die Bundesrepublik Deutschlands, wobei die Satellitenfotos vom BKG ebenfalls nicht direkt zum Download angeboten werden. Die genannten Daten wurden aufgrund der nicht direkten offline Bearbeitbarkeit in dieser Arbeit außer Acht gelassen. [72]

Neben den anderen Diensten enthält die Seite des BKG auch eine Sektion für ein INSPIRE-konformes Geographisches Gittersystem. Dieses definiert laut BKG kein eigenständiges Datenmodell, sondern beschreibt Festlegungen zur Georeferenzierung von Geodaten. Das Gittermodell findet beispielsweise Anwendung Datensatz des Zensus 2011 und bietet sich Analyse und Darstellung statistischer Sachverhalte an. [72]

In der Dokumentation zu Geographischen Gittersystemen des BKG findet sich die folgende Beschreibung: »Die europäische Initiative zum Aufbau einer Geodateninfrastruktur INSPIRE definiert im Dokument D2.8.I.2 Data Specification on Geographical Grid Systems – Technical Guidelines europaweit einheitliche Geographische Gitter. Ein grundlegender Parameter ist dabei das verwendete Georeferenzsystem. INSPIRE unterscheidet:

Equal Area Grids – auf der Grundlage von ETRS89-LAEA (EPSG:3035)

Zoned Geographic Grids – auf der Grundlage von ETRS89-GRS80 (EPSG::4258) [sic]

Für den Bereich Deutschlands sind Equal Area Grids von Interesse. Diese bilden gemäß INSPIRE ein hierarchisches System mit Gitterauflösungen von 1 m, 10 m, 100 m, 1 km, 10 km, 100 km.«[22]

Aus diesem Grund wird zur Darstellung in QGIS im Zuge dieser Arbeit das KBS ETRS89-LAEA (EPSG:3035) verwendet.

In der Dokumentation werden zudem einheitliche Bezeichnungen für Gitterzellen definiert [22]. Die Gitterzellen-Codierung für die Auflösungen 100 m und 1 km sehen dabei wie folgt aus:

Größe = 1 km: Ersten 4 Stellen der Koordinaten Ymin und Xmin

Größe = 100 m: Ersten 5 Stellen der Koordinaten Ymin und Xmin

Zellen-ID = <Größe>"N<Ymin>E<Xmin>, z.B. "1kmN3121E4112öder "100mN31210E41120"

### **3.2.9 Energie-Erzeugungs-Anlagen-Standorte NRW [LANUV]**

Das LANUV NRW stellt über OpenGeodata.NRW einen großen Datensatz für Energie-Erzeugungsanlagen (Strom und Wärme) mit Standorten für NRW zur Verfügung. Zudem enthalten sind zusätzliche Informationen wie Strom- und Wärmeverbräuche für Gemeinden. Der Datensatz kann für die Bestandsaufnahme zur örtlichen Darstellung von Anlagen sowie der gebietsweise aggregierten installierten Leistungen und Anlagenzahl je Energieträger genutzt werden. [75]

Eine direkt verfügbare Dokumentation zum Datensatz fand sich nicht, allerdings sind die Daten größtenteils selbsterklärend. Der Datensatz liegt sowohl als Geodatabase (.gdb) mit 555 MB als auch in mehreren Excel-Files (.xlsx) vor, wobei die Inhalte nicht vollständig deckungsgleich sind.

#### **Inhalts-Beschreibung: Excel-Datei zu Anlagen-Standorten:**

Ein Excel-File enthält die Standorte von Anlagen, wobei diese nach Energieträger bzw. Art der Anlage unterteilt in jeweils separaten Sheets abgespeichert sind. Zu den Energieträgerarten

bzw. Anlagentypen gehören: Biomasse, Deponiegas, Grubengas, Klärgas, PV-Freifläche, Wasserkraft, Wind, WEA in Planung, WEA stillgelegt, E-Tankstellen, Braunkohle, Steinkohle, Erdgas, Mineralöl, Sonstige (z.B. Kondensationsmaschinen und Gegendruckmaschinen), Müllverbrennungsanlagen (MVA), Grubenwasserschächte, Grubenwasserhaltungen, Grubenwasserprojekte, Industrielle-Abwärme und KWK-relevante-Industriestandorte. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Anlagentypen ergeben sich auch unterschiedliche Attributzuweisungen je Typ.

Zu den gelisteten Attributen (Spaltenbezeichnungen) je Anlage (Zeileneinträge) gehören im Allgemeinen eine LANUV-ID, zugehörige Verwaltungsgebiete, AGS, die PLZ, Gemeindenamen, Geo-Koordinaten in UTM32-Format, Status (z.B. 'in Betrieb'), Inbetriebnahme-Jahr, Leistung in kW, gegebenenfalls auch Leistung separat für Strom und Wärme in kW, Zahl der Einheiten und KWK (z.B. 'Ja', 'Nein', 'Nein, Ja', 'Ja, Nein') und der Stand der Daten. In manchen Fällen ist zusätzlich zur LANUV-ID auch eine korrespondierende MaStR-ID gegeben.

Zusätzliche Attribute gibt es z.B. für Windkraftanlagen. Hier werden auch, Hersteller, Anlagentyp, Durchmesser, Nabenhöhe und Höhe insgesamt gelistet. Etwas andere Attribute gibt es auch für Erzeugungs-Anlagen mit fossilen Brennstoffen (Braunkohle, Steinkohle, Erdgas, Mineralöl). Hier wird die elektrische Leistung in MW (brutto und netto) angegeben, ob Wärmeauskopplung gegeben ist und die CO<sub>2</sub>-Emissionen, gegebenenfalls auch weitere verwendete Brennstoffe und die Anzahl der Kraftwerks-Blöcke. Auch die Einträge sind nicht immer einheitlich bzw. unterscheiden sich vom Informationsgehalt. Bei MVA ist unter Wärmeauskopplung teilweise nichts vermerkt (Datenlücke) oder nur 'ja' bzw. 'nein', teilweise auch der Wärmeertrag für Fernwärme oder für Prozessdampf in MWh. Die Werte sind dann als string hinterlegt z.B. in der Form: 'Fernwärme: 2.069 MWh (2021)' oder 'Prozessdampf: 449.649 MWh (2021)'. Ähnliches gilt für den Stromertrag von MVA. Die Werte reichen von " (leer) über 'ja', 'nein' zu bspw. 'Stromabgabe: 85.406 MWh (2021)'.

#### **Inhalts-Beschreibung: Excel-Datei zu Anlagen-Standorten, Limitierungen:**

In der Excel-Datei sind keine Informationen zu PV-Anlagen auf Dächern enthalten, da diese laut enthaltener Vorbemerkung zahlenmäßig mit mehr als 315.000 Anlagen zu umfangreich seien.

Zudem werden aus Datenschutzgründen Anlagen mit kleiner 30 kW nicht mit exaktem Standort angegeben. Die Koordinaten zeigen in diesem Fall auf die Mitte der Postleitzahl. Laut LANUV sind für manche Anlagen einzelne Anlagenattribute nicht bekannt, weshalb der Datenbestand Lücken zeigt.

Die Daten zu Industrieller Abwärme aus der Potentialstudie des LANUV liegen nur gemeindescharf vor und sind recht unvollständig. Die potentielle Leistung und potentielle Abwärme wird als Bereich angegeben, in der Regel mit Faktor 10<sup>1</sup>, 10<sup>2</sup> oder 10<sup>3</sup> zwischen Minimum und Maximum.

Die vorliegenden Daten im Sheet 'KWK\_relevante\_Industriestandort' aus der zugehörigen Potentialstudie des LANUV enthalten als Attribut neben einer Objekt-ID, dem Unternehmensnamen, Geokoordinaten und der Aktualität der Daten lediglich einen Eintrag für den Prozesswärmeverbedarf in [GWh/a].

#### **Inhalts-Beschreibung: Excel-Datei zu aggregierten Wärme-Werten:**

Eine weitere Excel-Datei enthält aggregierte Werte zur installierten Wärmeerzeugungs-Leistung verschiedener Anlagentypen unterteilt nach den Verwaltungsgebiets-Größen Bundesland NRW, Regierungsbezirke, Planungsregionen, Kreise und Gemeinden je Sheet.

Zusätzlich finden sich hier Raumwärme- und Warmwasser- (zusammengefasst), Prozesswärme- (<500 °C) und Raumkälte-Bedarfe sowohl aktuell als auch prognostiziert für die Jahre 2030, 2040 und 2050. Für den Raumkälte-Bedarf gibt es allerdings keine Prognosen für die Jahre 2030 und 2040. Daten zu jährlichen Wärmeerträgen gibt es für die Energieträger Deponegas, Grubengas, Klärgas, Solarthermie, Geothermie, MVA, Warmes Grubenwasser, Industrielle Abwärme, KWK. Diese gibt es nicht für die Energieträger Biomasse, Braunkohle, Steinkohle, Erdgas, Mineralöl und sonstige Kraftwerke.

### **Inhalts-Beschreibung: Excel-Datei zu aggregierten Strom-Werten:**

Die letzte Excel-Datei enthält aggregierte Werte zur Stromerzeugung und ist ähnlich aufgebaut wie die Excel-Tabellen für aggregierte Werte der Wärmeerzeugung. Neben einem Übersichts-Sheet für NRW gibt es für jede Verwaltungsgebietsgröße (NRW, RBZ, Planungsregionen, Kreise, Gemeinden) zwei Sheets, einmal für alle erneuerbaren und einmal für alle konventionellen Energieträger.

### **Format und Aufbau der Geodatabase:**

Die Geodatabase hat das KBS EPSG:25832 und enthält insgesamt 325 einzelne Layer. Diese sind non-hierarchisch abgespeichert, lassen sich anhand der Layernamen aber gruppieren bzw. einteilen, zudem geben die Layernamen recht genau den Inhalt wieder.

### **Format der Geodatabase: Layernamen-Aufbau:**

Zur Einordnung der Layer, werden diese hier nach Art und Ausprägung, gegebenenfalls nach Ausführung unterteilt. Die Art wird durch den ersten Abschnitt im Layernamen (bis zum ersten Unterstrich) gekennzeichnet. Als Ausprägung gilt der zweite Teil des Layernamen (nach dem ersten Unterstrich) exclusive einer potentiellen räumlichen Einteilung (Ausführung), für welche Werte aggregiert wurden. Veranschaulicht wird diese Einteilung an den folgenden zwei Beispielen:

Beispiel Layername (mit Ausführung) = 'Biomasse\_Installierte\_Leistung\_RegBez'  
→ Art = 'Biomasse', Ausprägung = 'Installierte\_Leistung', Ausführung = 'RegBez'.

Beispiel Layername (ohne Ausführung) = 'Biomasse\_Standorte'  
→ Art = 'Biomasse', Ausprägung = 'Standorte'

### **Inhalt der Geodatabase: Layernamen-Arten:**

An Arten gibt es 22, wovon 18 für Energie-Erzeugungsanlagen stehen. Ausnahmen sind die vier Layer mit Art: 'z4', 'z6', 'Statistik' und 'StromInfra'. Die Art 'z4' umfasst ein Layer für Freileitungen und 'z6' eines für Kreise. Die Art 'Statistik' beinhaltet die beiden Ausprägungen 'Stromverbrauch' und 'Anteil\_EE\_am\_Stromverbrauch'.

Die Art 'StromInfra' beinhaltet die Ausprägungen für E-Tankstellen (Grünström, Gesamt) und Großspeicher. Die anderen 18 Arten stehen für verschiedene Energieträger, wobei es für PV und Wind jeweils 3 Arten gibt: 'PVDach', 'PVFrei', 'PVGesamt', 'Wind[Bb]etrieb', 'WindGen' und 'Windstill'. Anmerkung: Wegen Typo einmal 'WindBetrieb' und 18 mal 'Windbetrieb'.

Von den 13 Energieträgern insgesamt werden für Wärmeplanungen als direkt relevant die zehn Arten Biomasse, Braunkohle, Deponegas, Erdgas, Grubengas, Klärgas, Mineralöl, Müllver-

brennung, sonstigeKW, Steinkohle eingeordnet, als indirekt relevant die sieben Arten für die drei Energieträger Wind, Wasser und PV.

#### **Inhalt der Geodatabase: Layernamen-Ausprägungen und -Ausführung:**

Für die Layer nach Energieträgern gibt es die Ausprägungen 'Standorte', 'Anzahl\_an\_Anlagen' und 'Installierte\_Leistung', letztere beide in den Ausführungen 'NRW', 'RegBez', 'Planungs[Rr]eg', 'Kreise', 'RheinRevier', 'Gemeinde(n)'. Für die Arten 'Biomasse', 'Deponiegas', 'Grubengas', 'Klärgas', 'Müllverbrennung', 'PV(...)', Wasserkraft und 'Wind(...)' gibt es noch die Ausprägung 'Stromertrag' mit den gleichen Ausführungen.

#### **Bewertung auf Eignung:**

Die Standort-Daten der Wärme- und Stromerzeugungsanlagen der Geodatabase bieten sich sowohl zur kartographischen Darstellung als auch zur räumlichen Aggregation der installierten Leistung in Sub-Areale von Gemeinden an.

Die Industrielle-Abwärme-Standorte und KWK-relevante Standorte, welche nur im Excel-Dataset vorliegen, bieten sich zur Konvertierung in ein Vektorformat an, um diese zusätzlich zu berücksichtigen.

### **3.2.10 Energie-Erzeugungs-Anlagen-Standorte BRD [MaStR]**

Da der Fokus dieser Arbeit auf die Aufbereitung von Daten für NRW liegt, sei hier nur angemerkt, dass bundesweite Daten zu Energie-Erzeugungs-Anlagen wie deren Art, Standort und installierte Leistung im Marktstammdatenregister (MaStR) vorliegen. [74]

### **3.2.11 Raumwärmeverdarfs-Modell NRW [LANUV]**

Im Rahmen der 2015 vom LANUV durchgeführten Potentialstudie zum Geothermie-Potential in NRW hat das LANUV einen Raumwärmeverdarfs-Modell (RWB-Modell) entwickelt, welches über OpenGeodata.NRW zum Download angeboten wird. Das RWB-Modell ist ebenfalls im Web-Tool *energieatlas.nrw* integriert. [11] [75] [26]

#### **Inhalt:**

Das Modell umfasst zwei Datensätze. Der erste enthält Hausumringe mit modellierten Wärmebedarfen je Hausumring, der zweite enthält Wärmeliniendichten mit Wärmebedarfen je Straßenzug. Die modellierten Wärmebedarfe umfassen dabei die Bedarfe für Raumwärme und Warmwasser und sind jeweils absolut (je Hausumring bzw. Straßenzug) als auch relativ (je Flächeneinheit je Jahr bezogen auf die Nutzfläche bzw. je Längeneinheit je Jahr bezogen auf die Straßenlänge) angegeben. Die Berechnungsgrundlage ist beschrieben in [11].

Für die Hausumringe sind zudem zahlreiche weitere Angaben enthalten wie beispielsweise ein Objektschlüssel, die Gebäudehöhe, die Jahres-Mitteltemperatur, eine Gebäudeklasse, das Gebäudevolumen, ein Gebäudetyp, der AGS, die ID der Gitterzelle der INSPIRE-Raster, der Gemeindenname, der Kreisname sowie ein eindeutiger Objekt-Identifikator und eine ID des zugehörigen Straßenabschnitts. AGS, Gemeindenname und Kreisname beziehen sich auf die

Gemeinde bzw. den Kreis, in welcher der Hausumring steht.

Der Objektschlüssel ist laut Datensatz-Beschreibung in der im Download enthaltenen .pdf unterschiedlich für Bestand (ALKIS) und Neubau (LoD1). Die Gebäudeklasse bezeichnet eine Klassifikation der Gebäude nach Heizbedarf. Angegeben sind die Klassen null bis vier für nicht beheizte Gebäude (unabhängig des Objektschlüssels), Wohngebäude (nicht weiter differenziert), Nichtwohngebäude mit normalem, geringerem oder erhöhtem spezifischen Raumwärmeverbrauch. Der Gebäudetyp bezeichnet einen Typ für Wohngebäude wie Einfamilienhaus/Doppelhaushälfte (EFH/DHH), Reihenhaus (RH), Mehrfamilienhaus (MFH), Groß-Mehrfamilienhaus (GMFH) oder Hochhaus (HH). Die ID der Gitterzelle der INSPIRE-Raster ist für 100m-Raster angegeben, welche in dieser Form auch in den Zensus-Datensätzen Verwendung finden.

Die Bezeichnung *LoD1* beim Objektschlüssel bezieht sich auf 3D-Gebäudemodelle mit *Level of Detail 1*. *LoD1*- und *LoD2* Modelle für NRW werden beispielsweise von der Bezirksregierung Köln angeboten. Für NRW sind diese mit Stand April 2023 flächendeckend verfügbar. [2]

**Format:**

Die Daten für das RWB-Modell des LANUV liegen zum Einen als Geodatabase für ganz NRW vor, zum Anderen als einzelne Shape-Files für die digitalen Verwaltungsgebiete aller Gemeinden NRWs vor. Die Daten werden jeweils in komprimierter Form (.zip-Archiv) zum Download angeboten. Die Geodatabase für NRW bedarf dabei eines Speicherplatzes von 1,5 GB in komprimierter Form. Das verwendete KBS ist ETRS 89 / UTM Zone 32N (EPSG:25832).

**Eignung:**

Die Wärmebedarfe der Hausumringe eignen sich gut zur Aggregation in Sub-Arealen zur Abschätzung des Gesamt-Wärmebedarfs. Zudem bieten sich daraus abgeleitete Werte wie der spezifische Wärmebedarf je Sub-Areals-Fläche zur Abschätzung der Eignung von Wärmenetzen an. Die Wärmeliniederschläge je Straßenzug ist ebenfalls ein guter Indikator für das technische sowie wirtschaftliche Potential eines Wärmenetzes.

### 3.2.12 EE-Ausbaupotential NRW [LANUV]

Seit 2011 untersucht das LANUV die Potentiale von erneuerbaren und klimaeffizienten Energien in NRW. Im Zuge dieser Untersuchungen hat das LANUV seit 2012 ungefähr jährlich eine Potentialstudie veröffentlicht. Zum Stand dieser Arbeit umfasst diese Studienreihe in chronologischer Reihenfolge Potentialstudien zu Windenergie (2012), Solarenergie (2013), Bioenergie (2014), Geothermie (2015), Pumpspeicher (2016), Wasserkraft (2017), Grubenwasser (2018), Industrieller Abwärme (2019) und Kraft-Wärme-Kopplung (2021).

Die Studien enthalten je eine Darstellung des aktuellen Anlagenbestandes, eine Ermittlung von energetischen Potentialen auf Ebene der Verwaltungseinheiten NRWs (Land, Regierungsbezirk, Planungsregion, Kreis und Gemeinde) und die Bereitstellung von Ergebnissen und Grundlagen-daten im FIS Energieatlas NRW. Die Ergebnisse aller genannten Potentialstudien werden zudem gebündelt als Excel-Tabelle zum Download angeboten. [26]

Die Ergebnisse der Potentialstudien bieten wertvolle Anhaltspunkte für die Potentiale verschiedener Energieträger in einzelnen Gemeinden. Für Wärmeplanungen ist aufgrund der gemeinde-

scharfen Auflösung eine detailliertere Untersuchung und Einschätzung der lokalen Begebenheiten indiziert. Für eine weitere Aufbereitung der Daten im Zuge dieser Arbeit wird aufgrund der darliegenden Form und Fülle kein Bedarf gesehen.

### 3.2.13 Daten Geologischer Dienste für Geothermie-Potential-Bestimmungen

Für die Einschätzung des Geothermie-Potentials einer Region und die Planung von Anlagen-Standorten bieten sich die Daten verschiedener geologischer Dienste. Für Nordrhein-Westfalen gibt es beispielsweise die Web-Anwendung *Geothermie in NRW - Standortcheck* des Geologischen Dienstes NRW oder für Baden-Württemberg die Web-Anwendung *Informationssystem Oberflächennahe Geothermie für Baden-Württemberg (ISONG)* des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) [33] [69]. Eine Übersicht über die Geologischen Dienste der Länder bietet der Staatliche Geologische Dienst Deutschlands (SGD) [79].

Die dargebotenen Informationen sind landesspezifisch unterschiedlich in Ausmaß und Inhalt. Neben zahlreichen geologischen, hydrogeologischen und ingenieursgeologischen Karten bietet der Geologische Dienst NRW u.a. auch die erwähnte interaktive Karte für das Potential oberflächennaher, mitteltiefer und tiefer Geothermie an. Diese Geothermie-Potential-Karte ist lediglich in Form einer Web-Anwendung verfügbar, weshalb die Daten nicht im entwickelten Python-Tool integriert werden. [33]

### 3.2.14 Wärmenetze: Bestand und typische Kennzahlen

Eine Datengrundlage für bestehende Wärmenetze in NRW befindet sich derzeit beim LANUV im Aufbau. Das LANUV trägt diese Informationen in Kooperation mit Wärmenetzbetreibenden zusammen und bereitet diese für den *energieatlas.nrw* auf. [39]

Zum Zeitpunkt dieser Arbeit stehen bereits vorhandene, aufbereitete Daten über den *energieatlas.nrw* zur Verfügung, nicht jedoch zum Download. Das Fernwärmenetz der Wuppertaler Stadtwerke (WSW) ist beispielsweise wie in Abschnitt 2.3 in Abbildung 2.7 zu sehen ist, bereits im Web-Tool inkludiert. [26]. Von einer Integration im zu entwickelten Python-Tool wird daher abgesehen.

Zum Einschätzen typischer Kennzahlen von Bestands-Wärmenetzen bietet das Wärmenetz-Benchmarking des deutsch-niederländischen Projektes "Wärme in der Euregio - fokussieren und modernisieren" Wie<sup>fm</sup> eine gute Übersicht. Das Projekt wurde im Zuge des Programms Interreg der Europäischen Kommission gefördert und zielt darauf ab »eine klimafreundliche und nachhaltige Wärmeversorgung in der EUREGIO zu ermöglichen.« [77]

Untersucht wurden vom Wie<sup>fm</sup> insgesamt zwölf Wärmenetze im Münsterland. Ermittelt wurden u.a. Kennwerte wie Netzverluste, Anschlussdichten in MWh/(m·a), Systemeffizienz und der Primärenergiefaktor um die Wärmenetze beispielsweise nach ihrer Energieeffizienz und ihren Umweltauswirkungen zu bewerten. Die Netzverluste und Anschlussdichten wurden zudem mit Wärmenetzen in der Schweiz und in Dänemark verglichen. [77]

Typische Netzverluste lagen bei den untersuchten Wärmenetzen im Bereich zwischen 10 und 30 % und typische Anschlussdichten im Bereich zwischen 0,8 und 1,8 MWh/(m·a). [77]

---

# 4 Software-Entwicklung

In diesem Kapitel wird die Entwicklung des geforderten Python-Tools zur Aufbereitung der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Datensätze für Wärmeplanungen beschrieben. Welche Anforderungen an das Tool gestellt sind, ist in Abschnitt 4.1 aufgezählt. Das Setup, dazu gehören Betriebssystem und Software, welche zur Entwicklung und Testung des Tools verwendet wurden, wird in Abschnitt 4.2 beschrieben. Daraufhin wird der Entwurf der Software-Architektur in Abschnitt 4.3 vorgestellt. Im Anschluss wird in Abschnitt 4.4 für jeden Datensatz die Implementation im Code präsentiert.

## 4.1 Anforderungen: Lastenheft

Das im Zuge dieser Arbeit geplante Python-Tool soll Daten zur Wärmeplanung aus verschiedenen Datensätzen für die Nutzung in QGIS aufbereiten. Für jeden Datensatz sollen die folgenden Funktionalitäten (falls nötig) gewährleistet werden:

- Daten Einlesen
- Daten Zurechtschneiden (auf Region und Merkmale)
- Datenlücken Erkennen und kenntlich Machen und/oder mit Ersatzwerten Füllen
- Daten Exportieren in ein QGIS-kompatibles Format

## 4.2 Setup: Software, Hardware, IDE

In diesem Unterkapitel wird beschrieben, welches Setup verwendet wurde, um die Software zu entwickeln und zu testen. Die Setup-Beschreibung dient sowohl der Erkennung potentieller Kompatibilitätsprobleme als der Referenz für durchgeführte Performance-Messungen.

### Software-Setup:

Als Betriebssystem wurde die Linux-Distribution Ubuntu 20.04.6 LTS (Focal Fossa) mit Kernel 5.15.0-71-generic x86\_64 und der Desktopumgebung Xfce 4.14.2 verwendet und als Paketmanager für die Python-Umgebung conda 23.1.0. Die IDE Pycharm wurde in der Open Source Community-Edition Version 22.03.02 verwendet. Der in Pycharm verwendete Python-Kernel hat die Version 3.8.10. Die Versionen der verwendeten Python-Libraries sind als Kommentare im Code beim Import der Libraries mit angegeben.

### Hardware-Setup:

Als Hardware-Setup wurde ein Thinkpad E15 Gen 2 von Lenovo mit der CPU AMD Ryzen 7 4700U mit integrierter Graphikarte und 14,9 GB RAM verwendet. Zusätzlich zum RAM wurde das verwendete Swapfile im Zuge der Arbeit sicherheitshalber von 16 GB auf 32 GB vergrößert.

### Chronologie der Wahl der IDE:

Für die Entwicklung des Python Tools wurde neben *PyCharm* auch die integrierten Entwicklungsumgebungen (IDE, für englisch Integrated Development Environment) *Jupyter Notebook* und *Spyder* ausprobiert. Im Folgenden wird chronologisch erläutert, welche IDEs verwendet wurden, was für Vor- und Nachteile die jeweiligen IDEs mit sich bringen und was die Gründe zum Umsteigen waren.

Zu Beginn wurde *Jupyter Notebook* benutzt, welches einen integrierten IPython-Kernel beinhaltet und mit Libraries wie Pandas, Geopandas, Shapely und matplotlib kompatibel ist. Ein großer Vorteil von *Jupyter Notebook* ist die Möglichkeit Beschreibungs-Text und zellenweise segmentierten Code abwechselnd in einem Dokument zu erstellen. Die Zellen lassen sich einzeln ausführen und die Ausgabe inklusive Plots nach jeder Code-Zelle darstellen. Damit eignet sich *Jupyter Notebook* besonders gut zur Dokumentation und Erstellung interaktiver Beispiele mit Testdaten, in welcher zellenweise beschrieben wird, wie der Code funktioniert. Ein solches sogenanntes Notebook lässt sich zudem in pdf oder html Format exportieren, wobei die Outputs jeder Zelle mit exportiert werden. Eine Exportierung in regulären Python-Code ist mit minimalen Abänderungen möglich. Eine Aufteilung des Codes auf mehrere Dateien z.B. main.py und heatplanning.py für die Trennung von Programmcode und Klassen-, Methoden-, Attributs- und Funktions-Definitionen ist direkt möglich. Diese Beschränkung des Codes auf eine einzelne Datei ist ein Nachteil für umfangreichere Code-Projekte, weshalb zu einer anderen *Spyder* gewechselt wurde.

Im Anschluss wurde die IDE *Spyder* verwendet. Diese besitzt neben üblichen IDE-features wie Tab-basierten Textvervollständigungen auch ein Plot-Window, um Geo-Daten anzeigen zu lassen und eine integrierte Python-Konsole, um einzelne Code-Zeilen direkt auszuführen, wobei Zugriff auf die Variablen im ausgeführten Script besteht.

Letztlich wurde sich doch für die IDE *PyCharm* in der opensource Variante *Community Edition* entschieden. Diese IDE besitzt ähnliche Features wie *Spyder*. Beim Tippen einer Funktion wird beispielsweise direkt der zugehörige Docstring angezeigt, welche Input Parameter und Return Werte beschreibt. Darüber hinaus bietet *PyCharm* umfangreiche Refactoring-Funktionen wie eine dateiübergreifende Search-and-Replace-Option, um beispielsweise Methoden-Namen im gesamten Projekt zu ändern. Diese Funktionalitäten stellen nur einen marginalen Unterschied gegenüber *Spyder* dar. Der Umstieg geschah in erster Linie, um das Tool *Githup Co-Pilot* zu nutzen. *Githup Co-Pilot* ist ein KI-gestützter Assistent, welcher Vorschläge zur Code- und Kommentar-Vervollständigung anbietet. Ein Nachteil von *PyCharm* gegenüber *Spyder* ist allerdings, dass sich Plots in der Open Source Variante nicht direkt darstellen lassen.

## 4.3 Entwurf: Software-Architektur

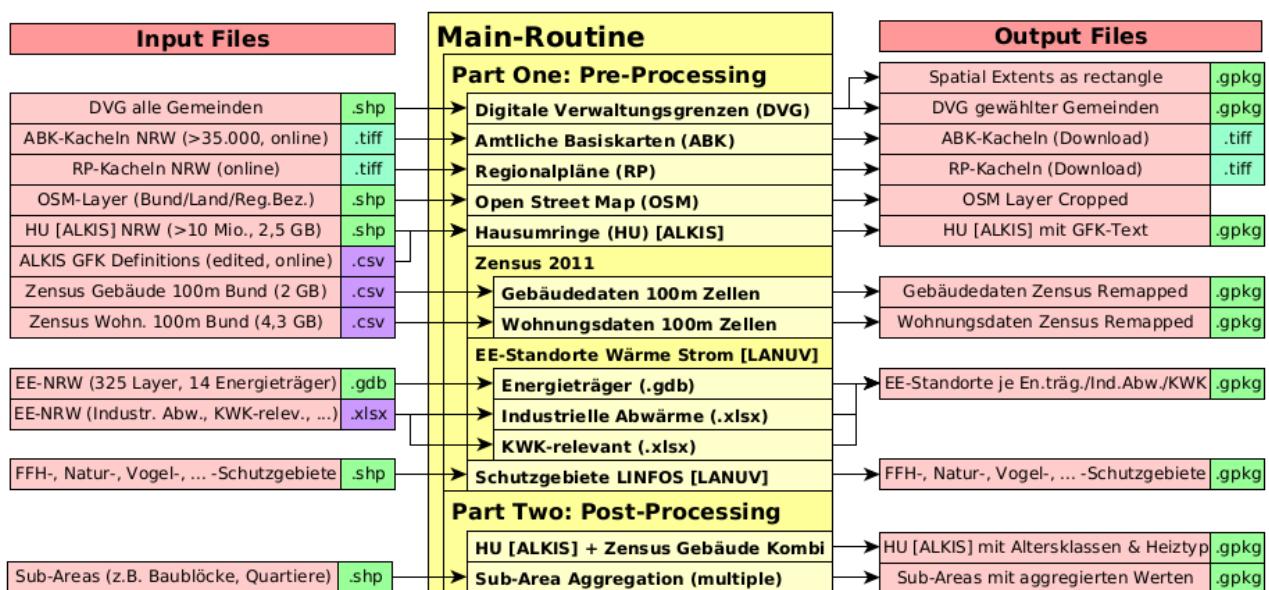
Um die in Abschnitt 4.1 aufgestellten Anforderungen für die einzelnen Datensätze zu erfüllen und eine übersichtliche, wartbare Software-Architektur zu entwerfen werden zwei Ansätze zur Software-Strukturierung gewählt. Zum einen soll das Programm einem prozeduralem Ansatz folgen. Das heißt die Datensätze werden in einzelnen Programmsequenzen nacheinander eingelesen und aufbereitet. Zum Anderen wird für Datensätze, die eine aufwendigere Prozessierung erfordern, ein objektorientierter Ansatz gewählt, in welcher eine Klasse für den Datensatz mit zugehörigen

Attributen und Methoden definiert wird. z.B. class zensusdata.

Der Code wird aufgeteilt in zwei Dateien. In der Datei *main.py* ist der eigentliche Programmcode, in der Datei *function\_list.py* stehen die Definitionen für allgemeine Funktionen und Klassen inklusiver ihrer zugehörigen Attribute und Methoden.

Die Main-Routine wird zusätzlich in zwei Teile untergliedert. Im ersten Abschnitt werden die gewählten Datensätze nacheinander geladen, präprozessiert (aufbereitet) und gegebenenfalls abgespeichert. Zur Präprozessierung gehört zum Beispiel das räumliche Zurechtschneiden, gegebenenfalls eine Filterung nach Merkmalen oder Layer und im Fall der Zensus-Daten ein Remapping der Daten. Im zweiten Teil findet die Postprozessierung (Nachbearbeitung) statt. Hier werden Synthese-Datensätze durch die Kombination ausgewählter Datensätze erstellt. Dies geschieht durch Zuweisungen neuer Attribute, deren Werte aus anderen Datensätzen abgeleitet werden, z.B. für Hausumringe oder Teilgebiete.

Abbildung 4.1 zeigt schematisch den Programmablauf, Input und Output Files des entwickelten Python-Tools. Vor Beginn der Main-Routine werden zunächst alle benötigten Libraries importiert und Einstellung (Settings) festgelegt. Zu den Einstellungen gehört die Definition globaler Variablen, Filepaths und URLs. Mit globalen Variablen wird bestimmt, welche Datensätze genutzt werden und gegebenenfalls welche Parameter hierfür gewählt werden (z.B. Gitterzellen-Größe und Qualitäts-Threshhold für die Zensus Datensätze). Das Tool unterstützt für manche Outputfiles mehrere Dateiformate. In der Abbildung sind die gewählten Default-Datei-Formate angegeben.



**Abbildung 4.1** Programm-Ablaufsplan mit In- und Output-Files je Datensatz inklusive Dateiformat

## 4.4 Implementation: Teil I - Preprocessing

Für jede der Datensatz-Bearbeitungs-Routinen im ersten Teil der Main-Routine wird das folgende Schema, teilweise in leicht abgewandelter Form, angewandt:

- 1) **Check directory structure**, file- and folderpaths
  - if necessary create folders
  - if necessary download data and re-set filepaths
- 2) **Load data** into pandas Dataframe or geopandas GeoDataframe
  - crop to spatial extents of DVG selected or celllist (during loading)
  - filter out layers/Merkmale or other things if filters are set (during loading)
- 3) **Preprocess data** which might include:
  - remapping of data (e.g. for Zensus data)
  - adding geometry and convert to GeoDataframe
  - translating attributes (e.g. GFK Code to GFK text for Hausumringe ALKIS data)
- 4) **Write data** to file(s)
- 5) **Preanalysis** (e.g. for Zensus data and Hausumringe ALKIS data)
- 6) **Download QGIS Style-Definitionen** from Github Repository

Für die Bearbeitung jedes Datensatzes in Teil eins der Main-Routine ist für die räumliche Zurechtschneidung der Daten erforderlich, dass ein GeoDataframe mit den gewünschten räumlichen Maßen geladen wird. Im Laufe dieser Arbeit wurden hierfür die DVG gewählter Gemeinden verwendet, aus deren räumlicher Ausdehnung (Spatial Extents) ein Rechteck-Polygon zur Begrenzung und zugehörige Zellen-Listen für zellen-(/kachel-)basierter Datensätze abgeleitet wurden.

Für die meisten Datensätze ist die räumliche Zurechtschneidung im Code obligatorisch angesetzt, was die Nutzung des DVG-Datensatzes voraussetzt (Dependancy). Alternativ ließe sich die Konstruktion eines Geodataframes zur räumlichen Abgrenzung auch anders bewerkstelligen.

Falls bereits präprozessierte Daten vorliegen, so werden diese in Schritt 2 geladen und Schritt 3 übersprungen. Für eine Nutzung in QGIS werden für manche Datensätze vorbereitete QGIS Styledefinitionen als .qml Dateien aus dem Github Repository des Python-Tools herunter geladen. Diese werden in QGIS automatisch beim Layer Laden mitgeladen, damit die Daten gleich korrekt dargestellt werden.

## 4.4.1 GV-ISys

Der Dataframe wird verwendet, um Postleitzahlen oder Ortsnamen Geokoordinaten für den jeweiligen Ortsmittelpunkt zuordnen zu können. Dies wird bei der Aufbereitung der Daten aus dem LANUV-Datensatz für Energie-Erzeugungs-Anlagen Standorte NRW benötigt, s. Unterabschnitt 4.4.8.

Das Sheet mit Liste aller politisch selbstständigen Gemeinden in Deutschland wird im Excel-File des GV-ISys Datensatzes wird in einen Pandas Dataframe eingelesen. Die 5 Headerzeilen werden aufgrund kombinierter Tabellen-Zellen ignoriert. Die Spalte mit Postleitzahlen wird als String eingelesen, damit vorangehende Nullen erhalten bleiben. Zum Referenzieren, werden die Variablen für Spaltennummern definiert, in denen sich die Segmente des ARS, die zugehörigen Gemeindenamen, Postleitzahlen, Längen- und Breitengrade finden.

## 4.4.2 Digitale Verwaltungsgrenzen (DVG)

Die DVG werden genutzt, um später andere Datensätze räumlich zurecht zu schneiden. Für die Erstellung eines Geodataframes mit den DGV ausgewählter Gemeinden wird das shape file mit den DGV aller politischer Gemeinden NRWs ausgelesen und die Einträge anhand eines Abgleichs mit einer Liste mit Gemeindenamen oder einer Liste mit AGS gefiltert.

Für die Filterung der Zensusdaten wird aus dem DVG-Geodataframe eine Liste mit Gitterzellen-IDs abgeleitet. Hierfür werden die bounds des DVG-Geodataframe, also die maximalen und minimalen X- und Y-Koordinaten ausgelesen. Aus diesen wird unter Angabe einer INSPIRE-kompatiblen Gitterzellen-Größe (z.B. '100m' oder '1km') die Liste mit Zellennamen erstellt. Die gelisteten Zellen decken im beim Zensusdatensatz verwendeten KBS (EPSG:3035) ein Rechteck ab, welches die DGV voll umfasst. Die Zellennamen-Konvention entspricht der Gitterzellen-ID-Konvention, welche auch im Zensus-Datensatz verwendet wird.

Für die Selektierung der passenden Raster-Files aus dem Datensatz für Regionalpläne und für Amtliche Basiskarten wird auf ähnliche Weise aus den Bounds des DVG-Geodataframe eine Liste mit passenden Kachel-Namen abgeleitet. Die Regionalpläne (RP) liegen in 8x8  $km^2$  Kacheln, die Amtlichen Basiskarten (ABK) in 1x1  $km^2$  Kacheln vor. Für RP und ABK gilt KBS = EPSG:25832

Als Namenskonventionen gelten jeweils:

Zensus: '<Einheit>N<y-Koordinate in <Einheit>>E<y-Koordinate in <Einheit>>

RP: 'rp\_32<y-Koordinate in km>\_<x-Koordinate in km>\_8\_nw'

ABK: 'abk\_32<y-Koordinate in km>\_<x-Koordinate in km>\_1'

Die Liste aus Kachel- bzw. Zellennamen sieht dann bspw. wie folgt aus:

Zensus (100 m): ['100mN31153E41077', '100mN31153E41078', '100mN31153E41079', ...]

Zensus (1 km): ['1kmN3115E4107', '1kmN3115E4108', '1kmN3115E4109', ...]

RP: ['rp\_32352\_5664\_8\_nw', 'rp\_32360\_5664\_8\_nw', 'rp\_32368\_5664\_8\_nw', ...]

ABK: ['abk\_32352\_5664\_1', 'abk\_32353\_5664\_1', 'abk\_32354\_5664\_1', ...]

Für die Filterung von Geodataframes anderer Datensätze wird aus den bounds ein rechteckiges

Polygon mit der räumlichen Ausdehnung (engl. spatial extent) in Form eines Rechtecks in INSPIRE-kompatiblen Koordinatensystem EPSG:3035 (LAEA Europe) erstellt.

Nicht implementiert ist die Definition von Rand-Abständen vom Rechteck-Geodataframe zu den eigentlichen DVG.

#### 4.4.3 ABK

Die Amtlichen Basiskarten (ABK) werden durch das Python-Tool automatisch von *OpenGeoData.NRW* heruntergeladen. Die Liste der Dateinamen aller Kacheln, welche das gewünschte Rechteck um die gewählten DVG abdeckt, entstammt der Subroutine für den DVG-Datensatz.

Da das Einladen von mehr als 800 einzelnen Raster-Dateien in QGIS nicht möglich ist, wurde zusätzlich ein Bash-Script geschrieben, um die einzelnen .tif-Dateien zusammen zufügen. Das Bash-Script nutzt die Command-Line-Tools *gdalwarp* und *gdalbuildvrt*. Ersteres wird verwendet, um die Georeferenzierung der .tif-Dateien von Ground Control Points (GCP) zu einer geoaffinen Georeferenzierung zu ändern. Diese Art der Georeferenzierung wird benötigt, damit im zweiten Schritt mit *gdalbuildvrt* alle einzelnen .tif-Dateien zu einem Mosaik in Form einer einzigen .vrt-Datei zusammengefügt werden können.

Ein automatischer Aufruf des Tools ist nicht implementiert, aber ein Hinweis auf eine manuelle Ausführung nach Verwendung des python-Tools wird bei einer ABK-Anzahl von 400 und größer ausgegeben.

#### 4.4.4 OSM

Jedes der 18 Layer der OSM-Daten wird einzeln eingelesen, zugeschnitten und abgespeichert. Der Zuschnitt erfolgt direkt beim Einlesen auf die bounds der gewählten DVG (Rechteck) und als Speicherformat wird standardmäßig Geopackage verwendet, optional auch Shape-File.

Zur bequemen out-of-the-box Nutzung der OSM-Daten in QGIS werden Style-Definitionen mit dem Python-Tool automatisch aus dem eigenen Github-Repository in den Ordner der zugeschnittenen OSM-Daten geladen. Beim Laden der Layer in QGIS werden die Styles automatisch mitgeladen. Hierfür sorgt die Gleichbenennung der Style-Definitionen im .qml-Format gemäß der OSM-Layer-Bezeichnung. [80]

Die eigenen Style-Definitionen basieren größtenteils auf denen von champs-libres aus dem Jahr 2020 [18]. Es wurden lediglich leichte Veränderungen vorgenommen. Beispielsweise wurde die Kolorierung einiger Objekte wie Gebäude, verkehrsrelevante Infrastrukturelemente wie Parkgebäude und -flächen sowie Flächen von Points of Interest angepasst. Zudem wurden in der aktuellen QGIS-Version nicht darstellbare Symbole im SVG-Format (Scalable Vector Graphic) ersetzt. Zu den verwendeten Symbolen gehören unter Anderem gekreuzte Hämmer für Tagebaue, Baumssymbole für Waldflächen und Sterne für Friedhöfe als religionsunspezifisches Repräsentationssymbol. Die Anpassung der Styledefinitionen wurde manuell in QGIS umgesetzt.

## 4.4.5 Hausumringe [ALKIS]

Um die Hausumringe aus dem ALKIS inklusive leserlicher Bezeichnung der Gebäudefunktion (GFK) darzustellen, werden diese in einen Geodataframe gelesen und um eine Spalte mit GFK in Textform erweitert.

Beim Einlesen wird der Geodataframe direkt mittels *fiona* auf die boundbox aus der räumlichen Ausdehnung der DVGs zugeschnitten. Mit dem gegebenen Setup dauerte das Einlesen inkl. Cropping für die Gemeinden Wuppertal, Velbert und Solingen auf diese Weise ca. 70 Sekunden. Das Einlesen des gesamten Shapefiles ohne Zuschneiden dauerte zum Vergleich über 15 min und nahm ca. 14 GB Arbeitsspeicher in Anspruch. Nachträgliches Cropping erwies sich zusätzlich zur langen Bearbeitungsdauer auch als ungeeignet, da während des Zuschneidens der Arbeitsspeicher von 16 GB und Swapfile von 16 GB überladen wurde.

Für die Übersetzung von GFK-Code zu GFK-Text wird die .csv-Datei mit GFK-Definitionen aus dem Github-Repository des Tools in einen pandas Dataframe gelesen. Im Anschluss werden die Codes der GFK-Spalte des Geodataframes in Textform übersetzt, dies geschieht vektorwertig mit der Funktion *.apply()*.

Die .csv-Datei wurde ursprünglich aus der .xml-Datei mit Definitionen aller ALKIS-Gebäude- und Bauwerksfunktionen aus dem ALKIS-Repository abgeleitet. Da die xml-Definitions sehr verschachtelt aufgebaut sind, wurde der ursprüngliche Code zum Extrahieren der GFK-Definitions zur Erstellung eines GFK-Übersetzungs-Dataframes beibehalten.

Zum Schluss wird der Geodataframe als GeoPackage und optional als Shapefile gespeichert.

### Minimalbeispiel:

Quellcode 4.1 zeigt ein Minimal-Code-Beispiel des entwickelten Software-Tool, in der beide Versionen zur Übersetzung der GFK-Codes mit originärer .xml-Datei (original version) und manuell modifizierter .csv-Datei (later version) gezeigt werden. Die Daten werden geladen, dabei zugeschnitten, die GFK-Codes übersetzt in GFK-Texte und die Datei als Geopackage (.gpkg) gespeichert.

```
1234 gdf_hu = gpd.read_file(fp_hu_shp_raw,
                           bbox=gdf_spatial_extent, engine="fiona")
1235 #hu_dict_df = get_hu_dict_df(fp_hu_gfk_xml) # original version
1236 hu_dict_df = pd.read_csv(fp_hu_gfk_mod_csv,
                           encoding='unicode_escape') # later vers.
1237 gdf_hu['GFK_text'] = gdf_hu['GFK'] # add column for GFK-Text
1238 gdf_hu['GFK_text'] = gdf_hu['GFK_text'].apply(gfk_code_to_text)
1239 gdf_hu.to_file(fp_hu_gpkg_crop, driver='GPKG')
```

Quellcode 4.1 Python Minimal-Beispiel: Präprozessierung Hausumringe Datensatz

### Anmerkung zur GFK-Code zu GFK-Text Übersetzung:

Die Methode *gfk\_code\_to\_text* wurde 'quick and dirty' geschrieben und ist 'bad practice', da sie auf der Verwendung globaler Variablen beruht (*hu\_dict\_df*). Die *.apply()* Funktion zur Übersetzung in einem sauberen Ansatz mit Pythons Lambda Funktion unter Verwendung mehrerer Argumente zu verwenden (*row, hu\_dict\_df*) gelang nicht ohne weiteres, weshalb die Methode so belassen wurde.

## 4.4.6 Raumwärme-Bedarfsmodell [LANUV]

Die Raumwärme-Bedarfsmodell liegen sowohl als über 1 GB großes komprimiertes Shape-File für ganz NRW vor als auch in Form von einzelnen komprimierten Shape-Files je Gemeinde in NRW. Um Speicherplatz zu sparen, werden nur die Rohdateien aller nötiger Gemeinden heruntergeladen.

Aus den DVG aller Gemeinden NRWs wird abgeleitet, welche Gemeinden innerhalb der Boundbox (Rechteck) um die ausgewählten Gemeinden liegen. Für die ausgewählten Gemeinden Wuppertal, Velbert und Haan, umfasst die erstellte Liste beispielsweise 26 Gemeinden u.a. Remscheid, Schwelm und weitere direkt umliegende Gemeinden. Es werden eine Liste mit den Gemeindenamen abgeleitet und eine zweite Liste mit den AGS der jeweiligen Gemeinden. Aus diesen beiden Listen werden die URL's der herunter zu ladenden komprimierten Shape-Files von *OpenGeoData.NRW* abgeleitet. Die Gemeindenamen werden entsprechend angepasst, durch Abschneiden gewisser Zeichenketten und Änderung von Umlauten in Vokalkombinationen oder "ßin bz".

Die Daten werden initial heruntergeladen, entpackt, in Geodataframes geladen, kombiniert, auf die erwähnte Boundbox (Rechteck) zugeschnitten und abgespeichert. Falls bereits präprozessierte und zugeschnittene in dieser Form vorliegen, werden diese geladen, statt den Prozess erneut durchzuführen. Sowohl Download als auch Entpacken als auch einzeln Laden und Zusammenfügen werden nur durchgeführt, falls die Daten nicht in der letzt-möglich präprozessierten Form vorliegen.

## 4.4.7 Zensus 2011

Da der Zensus-Datensatz das gesamte Bundesgebiet umfasst und diverse Merkmale abdeckt von denen nur ein Teil für Wärmeplanungen relevant ist, soll der Datensatz eingelesen und auf eine gewünschte Region und prädefinierte Merkmale reduziert werden. Des weiteren soll der Datensatz auf Datenlücken untersucht werden. Wenn möglich, sollen diese kenntlich gemacht und im Idealfall aufgefüllt werden. Zum Schluss soll der Datensatz in ein QGIS-kompatibles Format exportiert werden.

### 4.4.7.1 Zensus 2011 - Ansatz

Für eine einfache Nutzung in QGIS und zur leichteren späteren Verwendung mit anderen Datensätzen zusammen werden die Daten des Zensus stark pre-prozessiert. Hierfür wird ein neues Tabellen-Format gewählt, in welcher jeder Gitterzelle nur eine einzelne Zeile zugewiesen wird und die Anzahl erfasster Merkmals-Ausprägungen (z.B. Anzahl der Wohnungen mit Baualtersklasse von 19xx bis 19xx) in unterschiedlichen Spalten hinterlegt wird.

Für dieses aufwendigere Pre-Prozessieren wird für den Zensus-Datensatz ein objektorientierter Ansatz gewählt, indem die Klasse *zensusdata* definiert wird. Die Klasse ist mit einem *\_\_docstring\_\_* versehen, in welchem Attribute und Methoden erläutert werden. Dieser kann wie in Abbildung A.2 gezeigt mit *help(zensusdata)* innerhalb von Python abgerufen werden, zudem werden die Docstrings in gängigen IDEs bei Verwendung von Klassen und Methoden auch automatisch mit angezeigt.

Die Klasse `zensusdata` beinhaltet als Attribute unter anderem den Filepath zu den Rohdaten, optional eine Liste mit Gitterzellen-ID's zum Zurechtschneiden, eine Liste zur SpaltenReferenzierung (z.B. `identifier = 'Gitter_ID_100m'`, `key1 = 'Merkmals'`, `key2 = 'Ausprägung_Text'`, `value = 'Anzahl'`], ein Merkmals-Dictionary mit allen dem jeweiligen Merkmal zugehörigen Ausprägungen, eine Liste von Merkmalen, nach denen gefiltert wird, einen pandas dataframe mit orginalem Format, einen pandas data frame mit neuem Zeilen-/Spalten-Format und einen geodataframe mit der neuen Formatierung zum Bearbeiten innerhalb von Python.

#### 4.4.7.2 Zensus 2011 - Programmablauf

##### Daten einlesen und reduzieren:

Zu Beginn wird der gesamte Zensusdatensatz aus der csv-Datei in einen Pandas Dataframe geladen. Danach wird dieser mittels zwei Listen räumlich auf alle gewünschten Gitterzellen und auf alle zu untersuchenden Merkmale reduziert. Die Liste der Gitterzellen-IDs wird aus den Datensatz der DVG abgeleitet, s. Unterabschnitt 4.4.2, die Liste, welche als Merkmalsfilter dient, wird vorher definiert und beinhaltet default-mäßig die Baualtersklasse ('BAUJAHR\_MZ') und den Heiztyp ('Heiztyp').

##### Daten reformatieren (Remapping):

Um die Daten später in QGIS nutzen zu können, werden die Daten im Anschluss formatiert und hierfür in einen neuen Dataframe remapped. Alle Zeileneinträge gleicher Gitterzellen werden in eine einzelne Zeile des neuen Dataframe übertragen, wobei die Werte der Anzahl einer jeweiligen Merkmals-Ausprägung im neuen Dataframe jeweils einer neuen Spalte zugewiesen wird.

Es werden nur Spalten für Merkmale erstellt, nach denen auch mittels Merkmals-Filter beim Einlesen bereits gefiltert wurde. Die Bezeichnung dieser Spalten im neuen Dataframe werden einem Merkmals-Dictionary entnommen. Optional lassen sich in diesem Schritt bereits Merkmals-Ausprägungen zusammenfassen (z.b. zwei verschiedene Baualtersklassen), indem im Dictionary für mehrere Merkmals-Ausprägungen die gleiche neue Spaltenbezeichnung verwendet wird. Die Einzelwerte werden dann summiert. In Abbildung A.3 ist die Ausgabe des Docstrings für die entwickelte Methode zum Remapping in Python gezeigt.

##### Qualitäts-Check beim Remapping:

Je nach gewähltem Qualitäts-Schwellenwert (`zensus_q_threshold = 0, 1 oder 2`) werden beim Remapping nur Werte berücksichtigt, deren Datenqualität (Spalte `Anzahl_q`) dem Schwellenwert oder kleiner entsprechen. 0 steht für »keine bis nur geringe«, 1 für »starke« und 2 für »inakzeptable« Abweichung nach Zensus-Maßstäben. Zusätzlich werden zwei gesonderte Spalten für jedes gewünschte Merkmal hinzugefügt. Hier werden alle Einzelwerte der jeweiligen Gitterzelle deren Datenqualität den Wert 1 bzw. 2 besitzen summiert. Dies dient der Anzeige wie groß der Anteil an Daten mit Datenqualität 1 oder 2 in einer jeweiligen Gitterzelle für das entsprechende Merkmal ist.

##### Datenlücken erkennen und kenntlich machen:

Zur Kenntlichmachung von Datenlücken werden zwei weitere Spalten hinzugefügt. In diese wird die absolute und relative Differenz angegeben von der gesamten Anzahl aller Gebäude bzw. Wohnungen der Gitterzelle und der Summe der Gebäude bzw. Wohnungen die mit Merkmal

(entsprechend dem jeweiligen Q-Schwellenwert) erfasst wurden.

Hinweis: Wird der Zensus-Datensatz für Gebäude verwendet, können die Daten auch mit den offiziellen Hausumringen (HU) aus dem ALKIS abgeglichen werden, indem die Anzahl aller *Centroids* von HUen mit der im Zensus-Datensatz angegebenen Gesamtzahl an Gebäuden in der selben Gitterzelle abgeglichen werden.

### **Merkmals-Dictionary:**

Das Merkmals-Dictionary beinhaltet alle Merkmale als Keys. Für jedes Merkmal ist eine Liste mit Tuplen hinterlegt, wobei für jede Ausprägung ein Tuple enthalten ist. Diese Tuple enthalten die drei Einträge für den Zensus-Ausprägungs-Code, den Zensus-Ausprägungs-Text und die zugehörige neue Spaltenbezeichnung für das Remapping. Die letzten vier Einträge in der Liste für jedes Merkmal sind reserviert und enthalten Tuple für die Qualitäts-Spalten und Differenz-Spalten. Für das Merkmal 'BAUJAHR\_MZ' sieht die Liste bspw. wie folgt aus: [('1', 'Vor 1919', 'BauVor1919'), ('2', '1919 - 1948', 'Bau1919\_48'), ... , ('10', '2009 und später', 'BauNac2008'), (", 'q1', 'Q1Baujahr'), (", 'q2', 'Q2Baujahr'), (", 'Diff\_abs', 'DiffAbsAlt'), (", 'Diff\_rel', 'DiffRelAlt')].

Anmerkung: Als Standardeinstellungen werden allen Merkmals-Ausprägungen individuelle neue Spaltenbezeichnungen zugewiesen, die kleiner gleich 10 Zeichen lang sind, da diese sonst bei einem Shapefile-Export abgeschnitten würden.

### **Daten ableiten: Dämmpotential-Abschätzung**

Ein einfaches Modell zur Estimierung des Dämmpotentials wurde überlegt, aber nicht implementiert, aufgrund der Schwierigkeiten auf die Schnelle ein geeignetes tragfähiges Modell zu entwickeln.

Die Zensus-Daten in remappter Form bieten allerdings eine gute Form, um ein solches Modell einfach in Python oder QGIS zu implementiert. Ein einfaches Berechnungsmodell könnte z.B. wie folgt aussehen:

$$Dämm_{potential} = \left[ \sum_i^{N_{alt}} (n_{alt,i} \cdot g_{alt,i}) \right] \cdot A_{ges} = \left[ \sum_i^{N_{alt}} (n_{alt,i} \cdot g_{alt,i}) \right] \cdot \left[ \sum_j^{N_{fläche}} (n_{fläche,j} \cdot A_{fläche,j}) \right]$$

Wobei  $N_{alt}$  die Anzahl verschiedener Altersklassen ist,  $n_{alt,i}$  die Anzahl an Wohnungen der Altersklasse  $i$  in der jeweiligen Gitterzelle ist,  $g_{alt,i}$  der Gewichtsfaktor mit dem Wohnungen der jeweiligen Altersklasse berücksichtigt werden sollen,  $N_{fläche}$  die Anzahl verschiedener Wohnungsgrößenklassen und  $n_{fläche,j}$  die Anzahl der Wohnungen der Wohnungsgrößenklasse  $j$  in der jeweiligen Gitterzelle ist und  $A_{fläche,i}$  die Fläche mit der die jeweilige Wohnungsgrößenklasse berücksichtigt werden soll. Unberücksichtigt bei diesem Modell wäre Leerstand. Die unterschiedlichen Durchschnittsgrößen von Wohnungen verschiedener Altersklassen könnten im Gewichtungsfaktor mit berücksichtigt werden.

### **Geometriedaten hinzufügen und Speicherformate:**

Zum Schluss wird dem Dataframe eine Geometriespalte hinzugefügt in welcher die Polygone der Gitterzellen abgeleitet aus der Gitterzellen-ID in WKT-Format eingetragen werden. Der Dataframe kann direkt als .csv-Datei gespeichert werden oder zu einem geopandas GeoDataframe konvertiert und als ESRI Shapefile und/oder als OGC GeoPackage gespeichert werden.

### **Pre-Analyse-Routine:**

Zu Analysezwecken wird im stdout die Summe der Q1-, Q2- und DiffAbs-Spalten angegeben sowie der Mittelwert der DiffRel-Spalte. Negative und Positive Werte werden nicht separat berücksichtigt. Zusätzlich werden für jedes Merkmal im Merkmalsfilter Dataframes erstellt, in welcher die Gesamtzahl aller Einheiten (Wohnungen oder Gebäude) je Merkmals-Ausprägung absolut und relativ zur Gesamtzahl an Einheiten gelistet sind. Ebenso enthalten sind die Summen für alle Einheiten mit Merkmal, ohne Merkmal und insgesamt. Die Infos werden dem remapped Dataframe entnommen, dementsprechend werden nur Werte entsprechend dem Qualitäts-Schwellenwert berücksichtigt. Dies wird beim Speichern mit 'q0', 'q1' oder 'q2' im Dateinamen gekennzeichnet.

## **4.4.8 Energie-Erzeugungs-Anlagen Standorte NRW [LANUV]**

Um Vektordaten von Standorten für alle Energieträger aus der Geodatabase und zusätzlich für Industrielle Abwärme und KWK-relevante Anlagen aus der Excel-Datei auszulesen, gegebenenfalls mit Geometriedaten zu versehen (Excel-Datensatz) und abzuspeichern wurden die folgenden Schritte im Code implementiert.

### **Layerweise Vorgehen bei der Geodatabase:**

Da die Geodatabase über 325 Layer verfügt und jeder Geopandas GeoDataframe (GDF) nach Definition nur über ein Layer je GDF verfügt, wird jedes Layer separat als GDF in einem gemeinsamen Dictionary hinterlegt mit dem jeweiligen Layernamen als Key.

Zur Layer-Filterung wurde die Option einer Black- und einer Whitelist implementiert. Der Layername vor Einlesen mit beiden Filterlisten verglichen und das Layer gegebenenfalls übersprungen. Im Anschluss werden potentielle Tippfehler im Layernamen korrigiert, um diese zu vereinheitlichen. ('Windbetrieb' zu 'WindBetrieb' und 'Planungsreg' zu 'PlanungsReg', da hier beide Schreibweisen auftauchten.) Beim Einlesen des jeweiligen Layers wird der GDF bereits auf die Spatial Extents der gewählten DVG zugeschnitten (Rechteck).

Als Speicherformat für die zurechtgeschnittenen Layer wurde OGC GeoPackage gewählt. Eine optionale Schreiboption für Shapefiles wurde zu Beginn implementiert, aber auskommentiert. Hierfür wurden Attributeswerte mit dType 'Datetime' zu 'Strings' konvertiert und alle 'ß' in Attributnamen zu 'B'. Viele der insgesamt 75 in allen Layern zusammen genommenen auftretenden Spaltenbezeichnungen verfügen allerdings über mehr als 10 Zeichen (Shape-File-Limitierung), was für Geopackages kein Problem darstellt. Von einer Speicherung als Geodatabase wird ebenso abgesehen. Diese wäre auch nicht ohne weiteres möglich, da der offene GDAL Treiber für Geodatabase nur über Lese-, nicht jedoch über Schreibfunktionen verfügt.

### **Sheetweise Vorgehen bei Excel-Datei (Industrielle Abwärme, KWK):**

Um die Daten zu Standorten mit industrieller Abwärme und KWK-Relevanz aus der Excel-Datei einzulesen und in ein GeoPackage zu übertragen, werden die beiden Sheets zunächst in zwei Pandas Dataframes eingelesen. Beiden Dataframes wird eine Spalte mit Geometriedaten hinzugefügt. Für den Industrielle Abwärme Dataframe werden die x- und y-Koordinaten direkt aus dem Dataframe ausgelesen, für den KWK Dataframe wird die PLZ oder der Ortsname verwendet, da keine Geo-Koordinaten gegeben sind.

Beide Dataframes werden zu Geodataframes konvertiert, das KBS zu EPSG:25832 angepasst, auf die Spatial Extents der gewählten DVG zugeschnitten (Rechteck) und als Geopackage gespeichert.

#### Geometrie-Daten aus PLZ für KWK-Standorte:

Um die Geometriedaten für die Ortsmittelpunkte im KWK Dataframe zu bestimmen, wird über alle 587 der unikal auftretenden PLZ von insgesamt 1601 Einträgen iteriert. (Wenn PLZ mehrfach auftreten, wird nur einmal über diese iteriert.) Die Koordinaten der meisten PLZ werden mit der Python-Library *pgeocode* ermittelt (575), die übrigen, für welche dieser Ansatz nicht funktionierte, mit der etwas langsamer arbeitenden Python-Library *geopy* (12). Beide Librarys nutzen die PLZ und geben die Koordinaten im KBS EPSG:4326 (WGS84) aus.

Als Fall-Back-Alternativen falls diese Libraries nicht funktionieren sollten, wurden zwei eigene Methoden im Script hinterlassen. Die erste überprüft, ob die PLZ im GV-ISys Datensatz auftaucht, die zweite, ob der Ortsname <ort> direkt oder in abgewandelter Form in exakt dieser Schreibweise im GV-ISys Datensatz auftaucht. ('<ort>', '<ort>, Stadt', '<ort>, Hansestadt') notfalls ob es Gemeindenamen gibt, die den Ortsnamen überhaupt enthalten. Beide Methoden beachten Groß- und Kleinschreibung und lesen bei Fund aus diesem die Koordinaten im KBS EPSG:4326 (WGS84) ab.

Hinterlassen werden diese, um unerwartete Exponate bei Ortsnamen abzufangen, wobei die zuletzt beschriebene Methode gegebenenfalls zu falschen Ergebnissen führen könnte, da beispiels Methode c) fand beispielsweise für die PLZ 41538 Anwendung, für die Ortsnamen teils mit 'Dormagen' und teils mit 'DORMAGEN' angegeben waren.

Abbildung 4.2 zeigt den Stdout beim Ausführen des Python-Tools für diesen Datensatz mit der Default White- und Blacklist.

**Nachtrag:** Die genauen x- und y-Koordinaten in ETRS89/UTM32 (EPSG:25832) liegen auch im Datensatz für Industrielle Abwärme Standorte vor und sind mit den Bezeichnungen Rechtswert und Hochwert benannt. Die Georeferenzierung wurde korrigiert und wird in der aktuellen Version des Python-Tools aus diesen Koordinaten abgeleitet. Aus Zeitgründen wurden dieses Unterkapitel und Abbildung 4.2 nicht mehr korrigiert.

## 4.4.9 Schutzgebiete Landschaftsinformationssammlung (LIN-FOS) [LANUV]

Es können alle in der Landschaftsinformationssammlung (LINFOS) vom LANUV gesammelten Datensätze verschiedener Arten von Schutzgebieten vollständig automatisiert heruntergeladen, entpackt, von Shape-Files in Geodataframes geladen, räumlich zugeschnitten und als Geopackages abgespeichert werden.

```
NRW Standorte Strom Wärme (LANUV)
-----
layers_wanted: ['Biomasse_Standorte', 'Braunkohle_Standorte', 'Deponiegas_Standorte', 'Erdgas_Standorte', 'Klärgas_Standorte', 'Mineralöl_Standorte', 'Müllverbrennung_Standorte', 'PVFrei_Standorte', 'PVGesamt_Standorte', 'StromInfra_Grünstrom_Tankstellen', 'Wasserkraft_Standorte', 'WindBetrieb_Standorte', 'WindGen_Standorte']

start reading, cropping and writing layers (probably OVERWRITING!)...
from /media/gustav/Data/thesisdata/opengeodata.nrw/NRW_Standorte_Strom_Waerme/FIS
to /media/gustav/Data/thesisdata/opengeodata.nrw/NRW_Standorte_Strom_Waerme/FIS

Layer is read, cropped and written: Biomasse_Standorte
Layer is read, cropped and written: Deponiegas_Standorte
Layer is read, cropped and written: Erdgas_Standorte
Layer is read, cropped and written: Klärgas_Standorte
Layer is read, cropped and written: Mineralöl_Standorte
Layer is read, cropped and written: Müllverbrennung_Standorte
Layer is read, cropped and written: PVFrei_Standorte
Layer is read, cropped and written: PVGesamt_Standorte
Layer is read, cropped and written: StromInfra_Grünstrom_Tankstellen
Layer is read, cropped and written: Wasserkraft_Standorte
Layer is read, cropped and written: WindBetrieb_Standorte
Layer is read, cropped and written: WindGen_Standorte

Following Layers were empty after cropping and will not be written to file:
Layer is read, cropped and empty: Braunkohle_Standorte
Layer is read, cropped and empty: Grubengas_Standorte
Layer is read, cropped and empty: sonstigeKW_Standorte
Layer is read, cropped and empty: Steinkohle_Standorte
Layer is read, cropped and empty: StromInfra_Großspeicher

reading /media/gustav/Data/thesisdata/opengeodata.nrw/NRW_Standorte_Strom_Waerme/Standorte...
read the following sheets from xlsx file into dataframe(s):
['Industrielle_Abwaerme', 'KWK_relevante_Industriestandort']

KWK_relevante_Industriestandort: start adding geometry column and cropping to spatial extent for df:
KWK_relevante_Industriestandort: df with geometry is cropped and written to file:
    /media/gustav/Data/thesisdata/opengeodata.nrw/NRW_Standorte_Strom_Waerme/FIS_Datenbank.

Industrielle_Abwaerme: start adding geometry column and cropping to spatial extent for df:
    start assigning coordinates of ortsmittelpunkte from plz for 1681 entries in df
        counter: 0 of 587 unique PLZ in df used to assign coordinates to geometry
        counter: 100 of 587 unique PLZ in df used to assign coordinates to geometry
        counter: 200 of 587 unique PLZ in df used to assign coordinates to geometry
        counter: 300 of 587 unique PLZ in df used to assign coordinates to geometry
        counter: 400 of 587 unique PLZ in df used to assign coordinates to geometry
        counter: 500 of 587 unique PLZ in df used to assign coordinates to geometry
    Number of PLZ for which coordinates where derived by:
        method a) (pgeocode plz): 575
        method b) (gvisys plz): 0
        method c) (geopy plz): 12
        method d) (gvisys ort): 0
    Number of PLZ for which no coordinates where found: 0

Industrielle_Abwaerme: df with geometry is cropped and written to file:
    /media/gustav/Data/thesisdata/opengeodata.nrw/NRW_Standorte_Strom_Waerme/FIS_Datenbank.

needed time for dataset: 0 min 38 sec

PART ONE processing time: 0 min 44 sec
```

**Abbildung 4.2** Stdout Präprozessierungs-Routine für den Erzeugungs-Anlagen NRW Datensatz des LANUV

## 4.5 Implementation: Teil II - Postprocessing

### 4.5.1 Kombination von Hausumringen [ALKIS] und Gebäude-Merkmalen [Zensus]

Die Idee ist Hausumringen aus dem ALKIS Datensatz Ausprägungen von Merkmals-Ausprägungen aus dem Zensus-Gebäude-Datensatz zuzuordnen. Dies dient anschaulicheren Darstellungs-Möglichkeiten in GIS, in diesem Fall für die Darstellung der Baualtersklasse von Gebäuden, um das energetische Modernisierungspotential visuell abschätzen zu können.

Mit den Zensus-Datensätzen (remapped) für Wohnungen und Gebäude lässt sich in jeder Gitterzelle immer nur jeweils ein Attribut (z.B. Anzahl einer bestimmten Baualtersklasse wie 'BauVor1919') gleichzeitig übersichtlich darstellen, z.B. durch semi-transparente Einfärbung der Gitterzellen. Gegebenenfalls können noch ein, zwei weitere Attribute zusätzlich dargestellt werden, z.B. durch Einfärbung von darübergelegten Punkt- oder Linienmustern. Diese Darstellungsform eignet sich nicht zur simultanen Darstellung einer Vielzahl von Attributen. Die Zuordnung von Altersklassen aus den Zensus Gebäudedaten zu Hausumringen löst dieses Problem.

#### Hausumringe: GFK-Einordnung

Eine Zuweisung soll nur durchgeführt werden für Hausumringe, deren Bauwerks- und Gebäudefunktion (GFK) indiziert, dass diese auch als Gebäude in der Zensus-Datenerhebung mit erfasst wurden. Hierzu gehören alle GFK mit Wohnzweck.

Die Einordnung der GFK nach Wohnzweck wurde adhoc entschieden und manuell tabellarisch

zugeordnet. Die verwendete Tabelle mit ALKIS GFK-Code und GFK-Text Definitionen, wurde aus der .xml Datei von ALKIS extrahiert, als .csv-Datei gespeichert, manuell modifiziert und im Github-Repository für diese Thesis geladen. Das Python-Tool lädt bei Bedarf die .csv mit Definitionen aus dem Repository. [80]

Da zunächst fälschlicherweise davon ausgegangen wurde, dass auch Nichtwohngebäude (NWG) in den Zensusdaten erfasst wurden, wurde zuvor eine Einordnung der GFK nach Altersklassen-Relevanz vorgenommen. Diese Zuordnung für GFK von Wohn- und NWG wurde in einer separaten Spalte 'alt\_rel' in der .csv-Datei eingefügt und zu Analysezwecken beibehalten.

Als altersklassen-relevant wurden hierbei unter anderem GFK eingestuft aus dem Bereich Wohnen, GHD, Bildungs- und Forschungseinrichtungen, soziale Einrichtungen und Gebäude für öffentliche Zwecke. Als irrelevant wurden unter anderem GFK eingestuft wie Garagen, Schuppen, Überdachungen, Messe- oder Fabrikhallen, Burgen, Schlösser, Mauern.

### Hausumringe: Gitterzellen-Zuordnung

Für die Umsetzung wird im ersten Schritt zunächst die Zuordnung von Hausumringen zu Gitterzellen vorgenommen. Hierfür wird aus dem jeweiligen Polygon eines jeden Hausumrings der Centroid, also der jeweilige Flächenschwerpunkt bestimmt und als Attribut hinzugefügt. Aus den Koordinaten des Centroid wird nach deren Projektion ins KBS der Zensusdaten (EPSG:3035) die zugehörige Gitterzelle identifiziert und die Gitterzellen-ID als Attribut hinzugefügt. Das Hinzufügen der Attribute Centroid und Gitterzellen-ID wird vektoriell für den gesamten Geodataframe der Hausumringe umgesetzt. Mit dem entwickelten Python-Tool und der gegebenen Hardware dauert die Bestimmung der Centroids ungefähr 1 min und die Bestimmung der Gitterzellen-ID ungefähr 10 Sekunden für ca. 500.000 Hausumringe (Solingen, Velbert, Wuppertal).

### Hausumringe: Merkmals-Zuweisung aus Zensus Gebäude-Datensatz

Für die Zuweisung von Zensus Merkmals-Ausprägungen wird für jedes zuzuweisende Merkmal ein gleichnamiges Attribut im HU GDF hinzugefügt (neue Spalte), welches gleich dem zuzuweisenden Merkmal benannt ist. (z.B. 'BAUJAHR\_MZ' für Baualtersklassen oder 'Heiztyp' für die Heizungsform). Die Spalten sind zunächst mit dem Default-Wert 'Unbekannt' gefüllt.

Die Zuweisung der aus dem Zensus Gebäude-Datensatz entnommenen Werte wird iterativ für jede Gitterzelle mit Hausumringen durchgeführt. Gibt es keine korrespondierende Zelle im Zensus Gebäude-Datensatz, wird die jeweilige Zelle übersprungen. Andernfalls wird über alle zuzuweisenden Merkmale iteriert und für jedes Merkmal ( $merk, i$ ) wie folgt vorgegangen.

Zunächst wird eine Liste  $list_{zensus, merk, i, ausp, count}$  erstellt, in welcher die Anzahlen von Gebäuden einer jeden Merkmals-Ausprägung ( $ausp$ ) nach Zensus Gebäude-Datensatz gelistet werden. (z.B [0,3,0,3,0,0,0,0,0,0] bei zehn Ausprägungen ( $N_{merk, i, ausp} = 10$ ) mit den angegebenen Häufigkeiten in der Gitterzelle)

Damit die Zuweisung von Merkmals-Ausprägungen zu Hausumringen zumindest zellenweise vektorwertig durchgeführt werden kann, soll daraus eine Liste  $list_{hu, merk, i, values}$  abgeleitet werden, in welche die jeweiligen zuzuweisenden Attributwerte im Hausumringe GDF gelistet sind. (z.B. ['Bau1919\_48', 'Bau1919\_48', 'Bau1919\_48', 'Bau1979\_86', 'Bau1979\_86', 'Bau1979\_86' für das Attribut 'BAUJAHR\_MZ']) Die Länge von  $list_{hu, merk, i, values}$  muss dafür der Anzahl an Hausumringen entsprechen, denen Werten zugewiesen werden sollen.

Für die Erstellung dieser Attributs-Werte Liste für die Hausumringe wird gemäß der folgenden

Fallunterscheidung vorgegangen und die jeweils beschriebene Strategie gewählt, wobei  $N_{geb,merk,i} = \sum_j^{N_{merk,i,ausp}} n_{merk,i,ausp,j}$  die Summe der Anzahl der Gebäude mit Merkmal  $merk, i$  im Zensus-Datensatz in der jeweiligen Gitterzelle ist und  $N_{hu,zensus}$  die Anzahl an Hausumringen in der jeweiligen Gitterzelle ist, welche gemäß GFK im Zensus erfasst wurden.

- 0) Sonderfall: Keine korrespondierende Zensus-Gitterzelle → Zelle überspringen
- a) Regulärfall:  $N_{geb,merk,i} = N_{hu,zensus} \rightarrow$  Zuweisung eins-zu-eins
- b) Spezialfall:  $N_{geb,merk,i} > N_{hu,zensus} \rightarrow$  Zuweisung durch Reduktion nach Schema, s.u.
- c) Spezialfall:  $N_{geb,merk,i} < N_{hu,zensus} \rightarrow$  Zuweisung eins-zu-eins, übrige 'Unbekannt'

In Fall a) und c) wird  $list_{hu,merk,values}$  direkt aus  $list_{hu,merk,i,values}$  abgeleitet. Im Fall c) wird die Liste zusätzlich aufgefüllt mit Default-Wert-Einträgen. (z.B. ['Bau1919\_48', 'Bau1919\_48', 'Bau1919\_48', 'Bau1979\_86', 'Bau1979\_86', 'Bau1979\_86', 'Unbekannt' für eine Gitterzelle mit sieben Hausumringen, welche gemäß GFK im Zensus erfasst wurden, und fünf bekannten Altersklassen].

In Fall b) wird zunächst die Differenz  $diff = N_{geb,merk,i} - N_{hu,zensus}$  bestimmt. Die folgenden zwei Schritte zur virtuellen Reduktion der Altersklassen-Häufigkeiten geschehen sukzessive, um die Differenz auf null zu setzen. Anschließend wird die Differenz mit der Anzahl an Dreier-Einträgen in  $list_{zensus,merk,i,ausp,count}$  abgeglichen. Ist die Differenz kleiner der Anzahl an Dreier-Einträgen, so werden im ersten Schritt genügend zufällig gewählte Dreier-Einträge auf zu reduziert, das heißt die zufällig gewählten Merkmals-Ausprägungen, deren Häufigkeit drei in der Gitterzelle beträgt mit der Häufigkeit zwei betrachtet und die Differenz angepasst (, in diesem Fall auf null gesetzt). Ist die Differenz größer, so werden im ersten Schritt alle Dreier-Einträge auf zwei gesetzt und die Differenz-Variable entsprechend dekrementiert.

Reicht dies nicht aus, um  $diff$  null zu setzen, so werden im zweiten Schritt entweder genügend ( $diff$ ) zufällig gewählte Einträge größer 2 oder (falls  $diff$  zu groß ist) alle Einträge größer 2 in  $list_{zensus,merk,i,ausp,count}$  um eins dekrementiert und  $diff$  um die Anzahl dekrementierter Einträge dekrementiert. Schritt zwei wird solange wiederholt bis  $diff$  gleich Null ist.

Dieser Ansatz in Schritt eins wurde gewählt, da im Zensusdatensatz geheimahlungsbedingt erhobene Altersklassen-Werte von 2 mit dem Wert 3 angegeben werden. Der Ansatz in Schritt zwei wurde gewählt, damit zusätzliche potentiell auftretende Abweichungen, möglichst gleichmäßig über alle Altersklassen ausgeglichen werden können. Potentielle Abweichungen können beispielsweise durch den Abriss von Gebäuden entstehen, aufgrund unterschiedlicher Aktualität der Datensätze oder durch Erhebungsfehler.

### Limitierung des Synthese-Datensatzes

Da die Informationen zur jeweiligen Anzahl an Gebäuden einer Altersklasse je Zensus-Gitterzelle nicht gebäudescharf, sondern nur zellenscharf aufgelöst sind, erfolgt die Zuteilung beliebig. Nicht berücksichtigt im Algorithmus ist die Fläche der jeweiligen Hausumringe.

Dieser Synthese-Datensatz spiegelt nicht die reellen Altersklassen der spezifischen Hausumringe wider, kann allerdings genutzt werden, um die Häufigkeit aller Altersklassen auf einmal anzeigen zu lassen.

Von einer Auffüllung von Datenlücken (im Fall c)) (ungleich dem Default-Wert 'Unbekannt') wurde abgesehen, da von den merkmals-ausprägungs-erfassten Gebäuden je Gitterzelle nicht direkt auf die nicht-erfassten geschlossen werden kann. Eine anteilige Hochrechnung würde vermutlich nicht den reell vorliegenden Merkmals-Ausprägungen entsprechen. Bei einer niedrigen positiven Differenz von insgesamt erfassten Gebäuden und merkmals-erfassten Gebäuden ist davon auszugehen, dass Gebäude nicht erfasster Merkmals-Ausprägungen in der Häufigkeit eins vorliegen und geheimhaltungsbedingt mit null angegeben wurden. Eine Zufallsauswahl nicht nicht-erfassten Merkmals-Ausprägungen ist demnach nicht anzuraten. In Unterabschnitt 5.3.1 wird eine genauere Untersuchung zur Häufigkeit und Struktur solcher Gitterzellen vorgenommen.

### Preanalyse-Routine

Zur statistischen Auswertung wurde die Pre-Analyse-Routine für Hausumringe des ALKIS-Datensatzes erweitert. Neben der Häufigkeit an Hausumringen je GFK-Code wird zusätzlich je GFK-Code für jedes Zensus-Merkmal, das bei der Zuweisung verwendet wurde, die Häufigkeit (absolut und relativ) von Hausumringen erfasst, denen eine Merkmals-Ausprägung zugewiesen werden konnte. Beispielsweise, wurden von den 196.337 Hausumringen mit Wohnhaus GFK insgesamt 131.059 (ca. 66,75 %) eine Altersklassse und insgesamt 141.164 (ca. 71,90 %) ein Heiztyp zugewiesen. Die Analyse mit Speicherung der Häufigkeitsverteilung in einer .csv-Datei dauert ca. 1 Minute. Optional kann mit Setzung des Arguments *detailed = True* auch die Häufigkeit für jede Merkmals-Ausprägung einzeln für Hausumringe jeder GFK bestimmt werden. Die Routine ist nicht optimiert und dauert bei Durchführung etwa 30 Minuten.

## 4.5.2 Aggregation von Werten in Sub-Arealen (Demo: Baublöcke Wuppertal)

Die Aggregation von Werten in Sub-Areas ist im Python-Tool in einer Demo-Version implementiert. Als Sub-Areale können beliebige Polygone verwendet werden. Beispielhaft wurden zu Testzwecken Baublöcke Wuppertals verwendet, alternativ bieten sich quadratische Gitterzellen eines INSPIRE-kompatiblen Rasters an. [50]

Zu den aggregierten Werten gehört die Anzahl von Hausumringen im ALKIS-Datensatz absolut und jeweils mit den aus dem Zensus-Datensatz zugewiesenen Merkmals-Ausprägungen (z.B. die Anzahl der Gebäude einer bestimmten Altersklasse). Darüber hinaus werden die absoluten jährlichen Wärmebedarfe von Gebäuden im RWB-Modell des LANUV je Sub-Areal summiert. Daraus abgeleitet wurde der spezifische Wärmebedarf je Fläche und Jahr bezogen auf die gesamte Sub-Areal-Fläche als Indikator für die Eignung von Wärmenetzen zur Wärmeversorgung. Für die Zuordnung von Hausumringen zu Sub-Arealen wird der Centroid der Hausumringe verwendet.

Die Daten werden als Geopackage gespeichert und als KBS wird das ursprüngliche der Sub-Areale verwendet. Die QGIS Style-Definition ist als .qml-Datei im Github-Repository dieser Arbeit bereit gestellt. [80]

Ursprünglich geplant war noch die Aggregation von Daten zur Wärme- und Stromerzeugung je Sub-Areal aus dem Datensatz für Energie-Erzeugungs-Anlagen Standorte NRW des LANUV. Aus Zeitgründen wurde diese Funktion jedoch nicht mehr implementiert.

---

# 5 Analyse

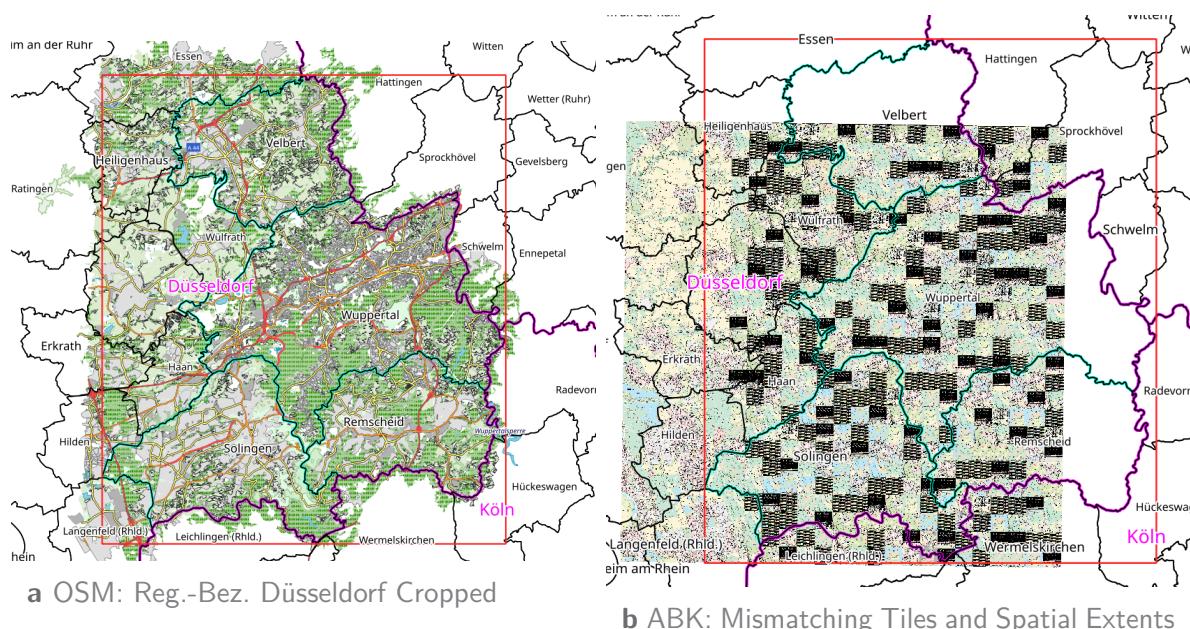
In diesem Kapitel wird exemplarisch die Anwendung des Tools für die Beispielregion um die Digitalen Verwaltungsgrenzen von Velbert, Wuppertal, Solingen (Rechteck) gezeigt. Die Anwendung des Tools wird für die einzelnen Datensätze demonstriert. Es werden Statistiken zu Lese-, Aufbereitungs- und Schreibzeiten des Tools sowie Dateigrößen beim Import- und Export gezeigt. Exemplarisch werden die durch das Tool autogenen Statistiken und die aufbereiteten Daten in QGIS mit den erstellen Layer-Style-Definitionen visuell ausgewertet.

## 5.1 Baselayer: OSM, ABK

Für das Baselayer soll hier die Anwendung des Python-Tools für OSM-Daten und Amtliche Basiskarten (ABK) gezeigt werden. Als gewählte Region wurden die DVG der Städte Wuppertal, Solingen und Velbert gewählt. Als Rohdaten wurde der OSM-Datensatz von Geofabrik für den Regierungsbezirk Düsseldorf gewählt.

Der OSM-Datensatz für den Regierungsbezirk Düsseldorf wurde von 1,1 GB (Shape-Files) in ca. 3 Minuten auf 284 MB (Shape-Files) bzw. in ca. 2 Minuten auf 137 MB (Geopackages) reduziert. Zu beachten ist, dass die gewählten Städte am Rande des Regierungsbezirkes liegen. Um das gesamte Rechteck abzudecken, welches durch die Bounds der gewählten DVG definiert wird, müsste entweder der OSM Datensatz für ganz NRW ausgewertet werden oder die OSM Daten der benachbarten Regierungsbezirke Köln und Arnsberg nach dem selben Verfahren zugeschnitten werden und die Datensätze wieder zusammengefügt werden, wobei doppelte Einträge entfernt werden sollten. In Abbildung 5.1a ist zu sehen, wie der OSM Datensatz an den Grenzen im Nordwesten, Westen und Südwesten zugeschnitten wurde.

Für den ABK-Datensatz wurden zunächst von den 35.026 insgesamt verfügbaren  $1 m^2$  Kacheln (TIFF-Format) entsprechend der aus den Spatial Extents abgeleiteten Liste an Kachelnamen 626 (1,1 GB) heruntergeladen. In Abbildung 5.1b ist allerdings zu erkennen, dass die zu Beginn abgeleiteten Kachelnamen nicht exakt den Koordinaten entsprechen. Zudem kam es in der im Screenshot zu sehenden Zoomstufe (Maßstab 1:500.000) zu Ladefehlern bei den Kacheln und QGIS hängte sich mehrfach auf. Eine Stichprobe mit Vergleich der ABK-Darstellungen mit den Hausumringen des ALKIS Datensatzes hat gezeigt, dass die Kacheln korrekt geographisch zugeordnet werden, da die Hausumringe nahezu deckungsgleich waren.



**Abbildung 5.1** Baselayer Cropping OSM und ABK auf gewählte DVG (türkis) (EPSG:3035)

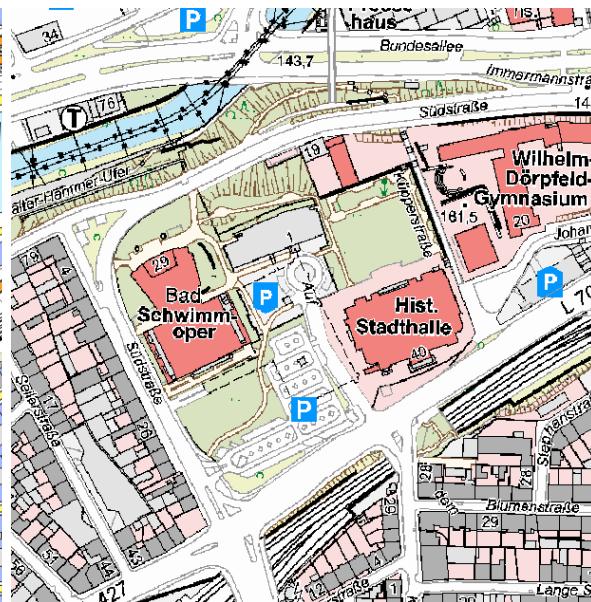
### Bugfix mismatching tiles and spatial extents; QGIS single file Raster-Layer-Limit:

Der Fehler wurde nachträglich behoben, sodass eine korrekte Liste an Kachelnamen ohne bis zu 8 km Offset kreiert wird und 811 Kacheln der ABK wahlweise in schwarz-weiß (482 MB) oder farbig (1,5 GB) heruntergeladen werden. Die korrekte Abdeckung des Rechtecks wurde mit einer Stichprobe der ersten und letzten Kachel getestet. Ein gleichzeitiges Laden aller 811 Kacheln als einzelne .tif-Dateien als Layer in QGIS für das gewählte Gebiet ist aufgrund der Datei-Anzahl nicht möglich.

**Nachtrag:** Es wurde kurzfristig noch ein Bash-Script geschrieben, welches die .tif-Dateien mit dem cli-tool *gdalbuildvrt* zu einer einzelnen .vrt-Datei zusammen fügt. Das Tool gab zunächst die irreführende Fehlermeldung, die .tif-Dateien seien nicht georeferenziert. Eine Untersuchung der Metadaten mit dem cli-tool *gdalinfo* zeigte eine Georeferenzierung in der Form von Ground Control Points (GCP). Der Fehler konnte durch die Änderung der Georeferenzierung von GCP hin zu geoaffiner Georeferenzierung behoben werden. Das Zusammenfügen der einzelnen .tif-Dateien zu einer Mosaik .vrt-Datei ermöglicht die Anzeige in QGIS und beschleunigte bei den 811 verwendeten Kacheln drastisch die Ladezeiten zum Rendern. Das Bash-Script ist im Github-Repository dieser Arbeit enthalten und wird vom Python-Tool automatisch aufgerufen und falls nötig zuvor aus dem Repository geladen.



a OSM: Exemplarische Detailansicht



b ABK: Exemplarische Detailansicht

**Abbildung 5.2** Baselayer Vergleich OSM und ABK im Detail (orig. 1:2500)

Eine exemplarische Darstellung zum Vergleich der beiden Datensätze als Baselayer ist in Abbildung 5.2 gezeigt. Ein Hervorheben von Gebäuden des öffentlichen Interesses wie in den ABK ist mit dem OSM Datensatz nicht ohne weiteres möglich. Eine Stichprobe in Wuppertal zum OSM-Gebäudedatensatz hat gezeigt, dass bei einem Großteil der Gebäude (überwiegend Wohnhäuser) keine Gebäudefunktion hinterlegt ist. In seltenen Fällen ist die angegebene Gebäudefunktion zudem inkorrekt. Zum Beispiel wurde für die Schwimmoper in Wuppertal die Gebäudefunktion 'Stadion' angegeben. Im ALKIS-Datensatz wird zum Vergleich korrekterweise 'Hallbad' als GFK angegeben. Bei den Hausumringen des Raumwärmebedarfs-Modell-Datensatzes des LANUV wird ebenfalls korrekterweise 'Badegebäude (allgemein)' angegeben. Für die Darstellung von Gebäuden sei daher auf die Hausumringe aus dem ALKIS Datensatz verwiesen. Zur Darstellung von Straßen, Flächen (Wohngebiete, Industrie, Wälder, Felder) erwies sich der OSM Datensatz als sehr gut geeignet.

## 5.2 Hausumringe [ALKIS]

Das Einlesen und Zurechtschneiden auf die DVG für Solingen, Velbert, Wuppertal wurde wieder mit dem rechteck-förmigen GDF aus den Bounds der gewählten DVG bewerkstelligt. Die Anzahl der Hausumringe wurden so von ca. 10 Mio. auf ca. 500.000 reduziert. Die Lese- und Schreibzeiten sowie Dateigrößen und -formate der Ein- und Ausgangsdateien sind in Tabelle 5.1 gezeigt.

Bei der Entscheidung Hausumringen Attribute aus dem Zensus-Gebäude-Datensatz zuzuweisen wurde sich für die Hausumringe des ALKIS-Datensatz entschieden, da eine vorläufige visuelle Stichproben-Untersuchung in QGIS ergeben hatte, dass sich die Geometrien der Hausumringe nahezu flächendeckend gleichen und beide Datensätze über ein Attribut für Gebäudefunktionen

Hausumringe [ALKIS]	Zeit für Spatial Extent GDF aus DVGs	Inputdaten .shp (NRW) Dateigröße	Lesen, Ggf. inkl. Zuschnitt	Anzahl Haus- Umringe	Ausgangsdaten .shp Dateigröße	Ausgangsdaten .gpkg Dateigröße	Gesamt Zeit
<b>Aus Rohdaten</b>	< 3 s	ca. 2 GB	ca. 66 s	ca. 500.000	ca. 260 MB ca. 169 s	ca. 154 MB ca. 87 s	< 7 min
<b>Aus Cropdaten*</b>	-	-	ca. 57 s	ca. 500.000	-	-	< 1 min

\*.gpkg zum Einlesen verwendet

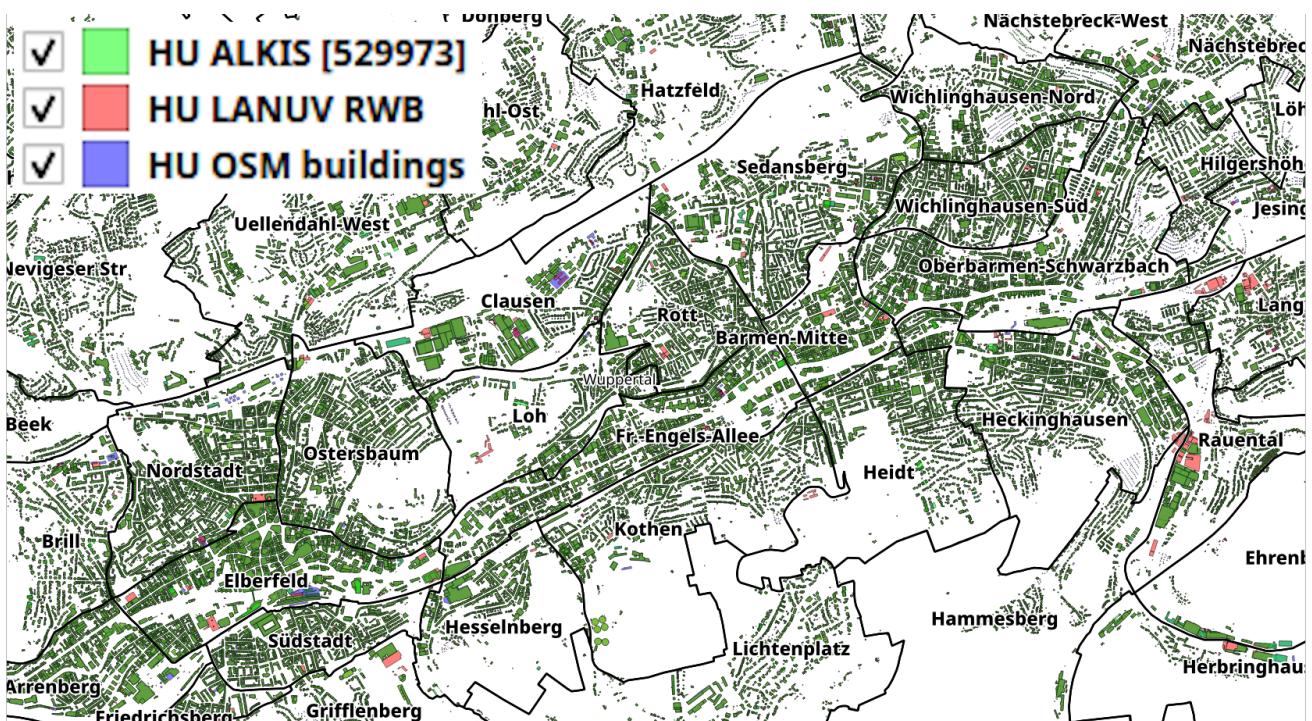
Anmerkung: Zuschnitt auf Rechteck um DVG von Wuppertal, Velbert, Solingen mit bbox=gdf\_spatial\_extent, engine=fiona

**Tabelle 5.1** Hausumringe ALKIS: Lese-, Schreibzeiten, Anzahl, In- und Output-Dateigrößen und -formate

besitzen, der ALKIS-Datensatz jedoch amtlich ist. Der OSM-Datensatz fiel für diese Wertezuweisung weg, da die Gebäudefunktionen nicht hinreichend angegeben sind. (S. auch Abschnitt 5.1)

### Vergleich der Hausumringe Geometrien [ALKIS, LANUV, OSM]

Eine nachträgliche etwas detailliertere Stichproben-Untersuchung wie in Abbildung 5.3 und Abbildung A.4 im Stadtgebiet Wuppertal, in welcher die Hausumringe des ALKIS-Datensatzes sowohl mit jenen des OSM- als auch jenen des LANUV-Datensatzes für deren Raumwärmebedarfsmodell abgeglichen werden, kommt zu einem ähnlichen Ergebnis, dass die drei Datensätze bezüglich der definierten Hausumrings-Polygone flächendeckend eine nahezu identische Geometrie aufweisen.



**Abbildung 5.3** Vergleich der Hausumringe-Geometrie [ALKIS, LANUV, OSM], Großansicht

Abbildung 5.3 zeigt einen Ausschnitt Wuppertals mit Überlagerung aller drei Hausumringe-Geometrien zum Vergleich als Großansicht. Einige nicht-deckungsgleiche Hausumringe sind hierbei allerdings auch zu erkennen. In den Stadtteilen Rauental und Langerfeld repräsentieren die roten Hausumringe z.B. Fabrikgebäude, Überdachungen und Gebäude der Wirtschaft oder Industrie im LANUV-Datensatz, die nicht im ALKIS- oder OSM-Datensatz auftauchen. Im Stadtteil Elberfeld gibt es Hausumringe für ein Wohnhaus, ein Kreditinstitut und ein Kino, welche nicht in den

anderen Datensätzen auftauchen. In Herbringhausen gibt es ein Fabrikgebäude, welches lediglich im ALKIS-Datensatz auftaucht. Manche der singulär auftretenden Hausumringe sind lediglich Parkdecks oder Überdachungen, welche für Wärmeplanungen vernachlässigt werden können.

Abbildung A.4 zeigt einen kleineren Ausschnitt Wuppertals (um das Rathaus in Barmen herum) mit den Hausumring-Geometrien aus dem ALKIS-, LANUV- und OSM-Datensatz sowie die ABK jeweils einzeln oder in Kombination zum Vergleich in Detailansicht. Die Hausumringe wurden genau wie in der Großansicht semitransparent (50 %) in den Farben grün, rot und blau (HTML-Codes #00FF00, #FF0000 und #0000FF) eingefärbt und wahlweise die ABK als Basislayer verwendet oder OSM Straßenzüge eingefügt. Die Legende zeigt zusätzlich die entstehenden Farbtöne bei Überlagerung von Hausumringen.

TYP	GFK	GFK_text	n_hu	perc_hu	perc_typ
BEHEIZTE WG  zensus = 1, alt_rel = 1	31001_1010	Wohnhaus	196.337	37,05	89,29
	31001_1000	Wohngebäude	6.807	1,28	3,10
	31001_1120	Wohngebäude mit Handel und Dienstleistungen	6.175	1,17	2,81
	31001_1100	Gemischt genutztes Gebäude mit Wohnen	4.380	0,83	1,99
	31001_1130	Wohngebäude mit Gewerbe und Industrie	3.769	0,71	1,71
	Top 5	BEHEIZTE WOHNGBÄUDE: SUB-SUMME	217.468	41,03	98,90
	alle 20	BEHEIZTE WOHNGBÄUDE: TYP-SUMME	219.897	41,49	100,00
BEHEIZTE NWG  zensus = 0, alt_rel = 1	31001_2000	Gebäude fA¼r Wirtschaft oder Gewerbe	21.439	4,05	38,68
	31001_2100	Gebäude fA¼r Gewerbe und Industrie	13.668	2,58	24,66
	31001_1310	Gebäude zur Freizeitgestaltung	5.329	1,01	9,62
	31001_2010	Gebäude fA¼r Handel und Dienstleistungen	4.348	0,82	7,85
	31001_2020	BÄ¼rogebäude	2.037	0,38	3,68
	Top 5	BEHEIZTE NICHT-WOHNGBÄUDE: SUB-SUMME	46.821	8,83	84,48
	alle 112	BEHEIZTE NICHT-WOHNGBÄUDE: TYP-SUMME	55.422	10,46	100,00
UNBEHEIZTE G  zensus = 0, alt_rel = 0	31001_2463	Garage	95.328	17,99	37,43
	51009_1610	Überdachung	69.258	13,07	27,20
	31001_2460	Gebäude zum Parken	21.061	3,97	8,27
	31001_2723	Schuppen	15.163	2,86	5,95
	31001_1313	Gartenhaus	14.544	2,74	5,71
	Top 5	UNBEHEIZTE GEBAUDE: SUB-SUMME	215.354	40,63	84,57
	alle 269	UNBEHEIZTE GEBAUDE: TYP-SUMME	254.654	48,05	100,00
Gesamt	alle 301	HAUSUMRINGS ALKIS: GESAMT-SUMME	529.973	100,00	100,00

Abkürzungen: WG = Wohngebäude, NWG = Nicht-Wohngebäude, G = Gebäude, n\_hu = Anzahl Hausumringe (hu)

perc\_<x> = prozentualer Anteil der hu an der Typ-Summe (typ) oder Gesamt-Summe (hu)

Datenquelle: Hausumringe ALKIS, Zuschnitt auf Rechteck um die Bounds der DVG von Wuppertal, Velbert und Solingen

**Tabelle 5.2** Hausumring-Anzahl der häufigsten GFK je GFK-Typ, einzeln und summiert

#### Häufigkeiten von Hausumringen nach Gebäude- und Bauwerksfunktion (GFK):

Was die Gebäudestruktur anbelangt, so befinden sich insgesamt 529.973 Hausumringe im zugeschnittenen Gebiet (Rechteck). Von diesen wird in 219.897 Fällen (ca. 41,5 %) gemäß GFK davon ausgegangen, dass sie im Zensus mitgezählt werden und in 275.319 Fällen (ca. 51,9 %) gemäß GFK davon ausgegangen, dass diese altersklassenrelevant sind, da eine Beheizung angenommen werden kann. Der Großteil der Hausumringe entfällt auf Wohnhäuser, Garagen und Überdachungen aus, welche jeweils zweistellige prozentuale Anteile an der Gesamtanzahl aller Hausumringe

besitzen. Zusammen stellen Wohnhäuser mit 196.337 (ca. 37,0 %), Garagen mit 95.328 (ca. 18,0 %) und Überdachungen mit 69.258 (ca. 13,1 %) insgesamt 360.923 (ca. 68,1 %) aller Hausumringe im gewählten Gebiet. Tabelle 5.2 zeigt für die 5 häufigsten GFK eines jeden selbst-definierten GFK-Typen (Beheizte Wohngebäude, Beheizte Nicht-Wohngebäude und Unbeheizte Gebäude) jeweils die Anzahl der Hausumringe (*n\_hu*) und den prozentualen Anteil an allen Hausumringen (*perc\_hu*) bzw. an allen Hausumringen des selben GFK-Typs (*perc\_typ*), sowie die summierten Werte für alle Hausumringe insgesamt bzw. für jeden GFK-Typ einzeln.

Die Daten zu Häufigkeiten von Hausumringen nach allen GFK wurden der erstellten .csv-Datei, welche im Python-Tool in Teil zwei nach Zuweisung von Zensus-Merkmales-Ausprägungen auf Hausumringe in einer Pre-Analyse-Routine in einem Dataframe erfasst und als .csv-Datei gespeichert werden, entnommen, sortiert, gekürzt, um Summen, Typ-Anteile und Typ-Benennungen ergänzt und visuell aufbereitet.

## 5.3 Zensus 2011 Datensätze

Eine Liste mit Zeiten zum Einlesen, Filtern, Zuschneiden, Remapping und Schreiben der Zensus Gebäude- und Wohnungsdaten mit dem entwickelten Python-Tool ist in Tabelle 5.3 gegeben. Die Zeiten für das Hinzufügen der Qualitäts- und Differenzspalten sowie der Geometriespalte inklusive Wertefüllung und die Konvertierung in einen GeoDataframe sind zusammen genommen mit unter 3 Sekunden in beiden Fällen vernachlässigbar. Auffallend ist der große Unterschied der Dateigrößen und Schreibzeiten in die Formate .csv, Shapefile und OGC Geopackage.

Zensus 2011 100m Gitter Datensätze	Rohdaten .csv Dateigröße	Lesen, Filtern, Cropping	Remap In neuen Dataframe	Ausgangsdaten .csv Dateigröße	Ausgangsdaten .shp Dateigröße	Ausgangsdaten .csv Dateigröße	Gesamt Zeit
<b>Gebäude</b>	ca. 2 GB	ca. 23 s	ca. 2 min	ca. 3,8 MB < 1 s	ca. 39 MB ca. 10 s	ca. 7,3 MB ca. 6 s	< 3 min
<b>Wohnungen</b>	ca. 4,3 GB	ca. 1 min	ca. 3 min	ca. 5,5 MB < 1 s	ca. 65 MB ca. 13 s	ca. 7,6 MB ca. 8 s	< 5 min

Anmerkungen: Zugescnitten auf Zellenliste im Rechteck um DVG von Wuppertal, Velbert, Solingen (cropping) und folgende Merkmals-Filter (Filtern)

Merkmales-Filter (Gebäude) = ['INSGESAMT', 'BAUJAHR\_MZ', 'HEIZTYP']

Zensus-Qualitäts-Schwellwert = 0

Merkmales-Filter (Wohnungen) = ['INSGESAMT', 'BAUJAHR\_MZ', 'HEIZTYP', 'NUTZUNG\_DETAIL\_HHGEN']

Software-Stand: 06.04.2023

**Tabelle 5.3** Zensus: Lese-, Remapping- und Schreibzeiten, In- und Output-Dateigrößen und -formate

Für die Analyse der Zensusdaten wird zunächst eine statistische Auswertung für einzelne Merkmale in der untersuchten Region in Unterabschnitt 5.3.1 vorgenommen. Abbildung 5.4 zeigt eine Liste der hierfür genutzten autogenerierten Pre-Analyse .csv-Dateien. Die Graphik zeigt zudem exemplarisch deren Form und die verwendeten Einstellungen, mit welchen diese erstellt wurden. (Drei Programmdurchläufe mit *zensus\_q\_threshold* = 0, 1 oder 2)

Im Anschluss wird eine visuelle Analyse der aufbereiteten Zensusdaten mit QGIS in Unterabschnitt 5.3.2 durchgeführt. Hier wird die räumliche Abdeckung der beider Zensus-Datensätze mit den Hausumringen aus dem ALKIS-Datensatz verglichen. Exemplarisch wird der Zensus Gebäude datensatz noch für ein Merkmal (Baualtersklasse) auf dessen Qualität und Vollständigkeit hin untersucht.

Autogenerated Files:		Exemplar-Darstellung einer .csv-Datei			
use_zensus_geb = 1		<b>zensus_q_threshold = 0</b> zensus_geb_analysis_q0_BAUJAHR_MZ.csv zensus_geb_analysis_q0_HEIZTYP.csv zensus_geb_analysis_q1_BAUJAHR_MZ.csv zensus_geb_analysis_q1_HEIZTYP.csv zensus_geb_analysis_q2_BAUJAHR_MZ.csv zensus_geb_analysis_q2_HEIZTYP.csv			
use_zensus_wohn = 1		695 Bytes [0] 447 Bytes [1] 692 Bytes [2] 447 Bytes [3] 690 Bytes [4] 446 Bytes [5]			
use_zensus_wohn = 1		BAUJAHR_MZ total % total % with BauVor1919 26213 14,4351072734482 17,1597090842438 Bau1919_48 17882 9,84735010352879 11,7060205945313 Bau1948_78 78969 43,4870478875721 51,6951538043585 Bau1979_86 11362 6,25688356315256 7,4378563511152 Bau1987_90 3185 1,75393189127274 2,08498353615826 Bau1991_95 4198 2,31177584915635 2,74811958706197 Bau1996_00 4562 2,51222520815895 2,98640341976577 Bau2001_04 3466 1,90867439094233 2,26893341799828 Bau2005_08 2244 1,23573725714789 1,46898055106409 BauNac2008 678 0,373364465394951 0,443836369706531 with 152759 84,1220978897749 100 without 28833 15,8779021102251 18,87482897898 INSGESAMT 181592 100 118,87482897898			
		Table is content of zensus_geb_analysis_q0_BAUJAHR_MZ.csv <b>zensus_m_filter_geb = ['INSGESAMT', 'BAUJAHR_MZ', 'HEIZTYP']</b> <b>zensus_m_filter_wohn = ['INSGESAMT', 'BAUJAHR_MZ', 'HEIZTYP', 'NUTZUNG_DETAIL_HHGEN']</b>			
		<b>Definitionen globaler Setting-Variablen für gezeigten Output in dunkelgrau unterlegt</b>			

Abbildung 5.4 Liste und Form autogenerierter merkmalsspezifischer Zensus Pre-Analyse .csv-Dateien

### 5.3.1 Zensus Merkmals-Ausprägungs-Statistiken

#### Gebäude- und Wohnungsstruktur: Baujahr

Die zusammengefassten Ergebnisse der Pre-Analyse-Routine der Zensus-Daten im entwickelten Python-Tool bezüglich der Altersklassen-Verteilung der Gebäude und Wohnungsdaten für die Qualitäts-Schwellenwerte (0 und 1) sind in aufbereiteter Form in Tabelle 5.4 dargestellt. Da im Gebäudedatensatz keine Altersklassen-Angaben mit Qualität 2 vorliegen und im Wohnungsdatensatz nur für vernachlässigbare 203 Gebäude die Altersklassen mit Qualität 2 angegeben war, wurden die Zahlen für den Qualitäts-Schwellenwert 2 in der Tabelle exkludiert.

Zensus 2011	Anzahl mit Anzahl_q = 0						Anzahl mit Anzahl_q <= 1					
	Merkmal	Zensus Wohn.			Zensus Geb.			Zensus Wohn.			Zensus Geb.	
		total	% total	% with	total	% total	% with	total	% total	% with	total	% total
BauVor1919	BAUJAHR_MZ	74.215	14,56	<b>17,16</b>	26.213	14,44	<b>17,16</b>	78.927	15,49	<b>16,87</b>	26.290	14,48
Bau1919_48		41.710	8,18	<b>9,65</b>	17.882	9,85	<b>11,71</b>	46.169	9,06	<b>9,87</b>	17.901	9,86
Bau1948_78		247.722	48,61	<b>57,29</b>	78.969	43,49	<b>51,70</b>	258.887	50,80	<b>55,35</b>	79.026	43,52
Bau1979_86		25.018	4,91	<b>5,79</b>	11.362	6,26	<b>7,44</b>	30.731	6,03	<b>6,57</b>	11.493	6,33
Bau1987_90		5.275	1,04	<b>1,22</b>	3.185	1,75	<b>2,08</b>	6.596	1,29	<b>1,41</b>	3.462	1,91
Bau1991_95		13.144	2,58	<b>3,04</b>	4.198	2,31	<b>2,75</b>	16.025	3,14	<b>3,43</b>	4.302	2,37
Bau1996_00		13.162	2,58	<b>3,04</b>	4.562	2,51	<b>2,99</b>	16.024	3,14	<b>3,43</b>	4.806	2,65
Bau2001_04		6.216	1,22	<b>1,44</b>	3.466	1,91	<b>2,27</b>	7.524	1,48	<b>1,61</b>	3.565	1,96
Bau2005_08		4.405	0,86	<b>1,02</b>	2.244	1,24	<b>1,47</b>	5.088	1,00	<b>1,09</b>	2.337	1,29
BauNac2008		1.533	0,30	<b>0,35</b>	678	0,37	<b>0,44</b>	1.766	0,35	<b>0,38</b>	714	0,39
with		<b>432.400</b>	<b>84,85</b>	<b>100,00</b>	<b>152.759</b>	<b>84,12</b>	<b>100,00</b>	<b>467.737</b>	<b>91,78</b>	<b>100,00</b>	<b>153.896</b>	<b>84,75</b>
without		77.232	15,15	<b>17,86</b>	28.833	15,88	<b>18,87</b>	41.895	8,22	<b>8,96</b>	27.696	15,25
INSGESAMT		<b>509.632</b>	<b>100,00</b>	<b>117,86</b>	<b>181.592</b>	<b>100,00</b>	<b>118,87</b>	<b>509.632</b>	<b>100,00</b>	<b>108,96</b>	<b>181.592</b>	<b>100,00</b>
with (q = 1)		-	-	-	-	-	-	35.337	6,93	<b>7,55</b>	1.137	0,63

Gebiet: Rechteck um DVG von Wuppertal, Velbert und Solingen

Tabelle 5.4 Baualtersklassen-Verteilung für Wohnungen und Gebäude im Wahlgebiet im Vergleich

In der Tabelle sind die relativen Anteile der Wohnungs- oder Gebäudeeinheiten je Altersklassen jeweils in Bezug zur Gesamtzahl aller Einheiten (% total) und zur Gesamtzahl aller Einheiten mit erfasster Altersklasse (% with) gezeigt. Zu erkennen ist auch, dass im Gebäudedatensatz kaum Altersklassen-Daten mit Qualität 1 vorliegen und sich die Zahlen je nach gesetztem Qualitäts-Schwellenwert kaum unterscheiden. Insgesamt sind ca. 84 bis 85 % aller Gebäude mit Altersklasse erfasst und je nach gesetztem Qualitäts-Schwellenwert ca. 84,9 oder 91,8 % aller Wohnungen.

Es ist deutlich zu erkennen, dass mehr als die Hälfte aller Gebäude und Wohnungen aus der Periode von 1948 bis einschließlich 1978 entstammen. In dieser Periode (Nachkriegsjahre) wurden auch im Schnitt mit deutlichem Abstand zu den anderen Altersklassen die meisten Wohnungen und Gebäude pro Jahr gebaut (mehr als doppelt so viele Wohnungen je Jahr verglichen mit jeder anderen Altersklasse mit Zeitgrenzen). Das führt dazu, dass über 80 % aller Gebäude und Wohnungen älter als 45 Jahre sind (Bau bis 1978) und damit überwiegend vor der ersten Wärmeschutz-Verordnung 1977 erbaut wurden. Zudem weisen insbesondere die Gebäude aus der direkten Nachkriegszeit in den 1950er-Jahren historisch bedingt durch die nach dem Krieg bestehende Wohnungsnot und Materialknappheit eine tendentiell geringere Qualität der Bausubstanz auf, mehr noch als Gebäude aus den 1920er-Jahren. [9]

Diefenbach kam 2013 zum Ergebnis, dass im Schnitt ca. 64 % der Gebäude bis 1978 gebaut wurden (s. Tabelle A.1) [45]. Die gewählte Region weist damit einen überdurchschnittlich alten Gebäudebestand auf.

### Gebäude- und Wohnungsstruktur: Heiztyp

Nach dem gleichen Schema wurden die Häufigkeiten der einzelnen Merkmals-Ausprägungen des Heiztyps für Wohnungen und Gebäude in Tabelle 5.5 zusammengefasst. Da in der untersuchten Region im originalen Zensus Gebäudedatensatz kaum Anzahl-Werte einzelner Heiztypen mit der Qualität 1 (insgesamt 130) und keine mit Qualität 2 angegeben waren, wurden diese nur gekürzt und ausgegraut in der Tabelle dargestellt. Beim Wohnungsdatensatz zeigt sich ein etwas anderes Bild. Hier stehen den 440.398 Heiztyp-Angaben mit Qualität 0 insgesamt 31.632 Heiztyp-Angaben mit Qualität 1 und vernachlässigbare 268 Heiztyp-Angaben mit Qualität 2 gegenüber, welche ebenfalls nur gekürzt in ausgegraut dargestellt wurden. Bei der Veränderung des Qualitäts-Schwellenwerts von 0 auf 1 steigert sich nicht nur der relative Anteil aller Wohnungen mit Heiztyp-Angabe von 86,41 % auf 92,62 %, auch die Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Heiztypen ändert sich.

Ursächlich hierfür ist nach eigener Vermutung die starke Dominanz von Zentralheizungen als Heiztyp, welche über 70 % der erfassten Heiztypen in Wohnungen und über 82 % in Gebäuden ausmachen. Dies führt dazu, dass die erfassten Häufigkeiten seltener auftretender Heiztypen mit größerer Ungenauigkeit (schlechterer Datenqualität) versehen sind. Der zweithäufigste Heiztyp stellt Etagenheizungen dar, welche einen Anteil von ca. 23,5 % bei Wohnungen und ca. 15 % bei Gebäuden an allen erfassten Heiztypen ausmachen. Über einen Fernwärme-Anschluss, dem dritthäufigsten erfassten Heiztyp, verfügen lediglich zwischen 2 und 4 % der Wohnungen und ca. 2 % der Gebäude. Mit Blockheizungen werden weniger als 1 % aller Wohnungen und Gebäude versorgt. Ohne Heizung ausgestattet sind nur ca. 1 Promille der Wohnungen bzw. ein halbes Promille der Gebäude.

Die unterschiedliche Heiztyp-Verteilung im Gebäude- und Wohnungsbestand lassen sich daraus herleiten, dass Gebäude mit Heiztyp Zentralheizung tendenziell eine geringere Wohnungszahl je

Zensus 2011	Anzahl mit Anzahl_q = 0						mit Anzahl_q <= 1			q = 1	q = 2	
Merkmal HEIZTYP	Wohnungen			Gebäude			Wohnungen			Geb.	Wohn.	Geb.
	total	% total	% with	total	% total	% with	total	% total	% with	total	total	total
Fernwärme	10.693	2,10	2,43	3.219	1,77	1,95	15.482	3,04	3,28	49	221	0
EtagenHeiz	103.290	20,27	23,45	25.032	13,78	15,16	112.137	22,00	23,76	0	0	0
BlockHeiz	2.391	0,47	0,54	689	0,38	0,42	4.024	0,79	0,85	54	47	0
ZentrIHeiz	323.497	63,48	73,46	136.113	74,96	82,43	339.721	66,66	71,97	24	0	0
1+Raumöfen	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0	0
KeineHeiz	527	0,10	0,12	79	0,04	0,05	666	0,13	0,14	3	0	0
with	440.398	86,41	100,00	165.132	90,94	100,00	472.030	92,62	100,00	130	268	0
without	69.234	13,59	15,72	16.460	9,06	9,97	37.602	7,38	7,97	-	-	-
<b>INSGESAMT</b>	<b>509.632</b>	<b>100,00</b>	<b>115,72</b>	<b>181.592</b>	<b>100,00</b>	<b>109,97</b>	<b>509.632</b>	<b>100</b>	<b>107,97</b>	-	-	-
<b>with (q = 1)</b>	-	-	-	-	-	-	<b>31.632</b>	<b>6,21</b>	<b>6,70</b>	-	-	-

Gebiet: Rechteck um DVG von Wuppertal, Velbert und Solingen

**Tabelle 5.5** Heiztyp-Häufigkeiten für Wohnungen und Gebäude im Wahlgebiet im Vergleich

Gebäude besitzen als bei den anderen erfassten Heiztypen.

#### Wohnungsstruktur: Nutzung nach Belegung durch Haushalt:

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung in der Pre-Analyse-Routine für die Merkmals-Ausprägung-Verteilung des Merkmals Nutzung nach Belegung durch Haushalte im Wohnungsdatensatz sind in Tabelle 5.6 gezeigt. Da im gewählten Gebiet keine Nutzungs-Anzahl-Werte die Qualität 2 besitzen, wurden deren Summation aus der Tabelle exkludiert. Eine Anhebung des Qualitäts-Schwellenwert auf 1 führt je nach Ausprägung zu marginalen, bis gar keinen Änderungen, gleichfarbig bzw. dunkelgrau gekennzeichnet.

Merkmal: NUTZUNG_DETAIL_HHGEN	Anzahl						Beschreibung (Merkmal)			
	Wohnungen mit Anzahl_q = 0			Wohnungen mit Anzahl_q <= 1			q = 1	Nutzung nach Belegung durch Haushalt		
	total	% total	% with	total	% total	% with		Beschreibung (Ausprägungen, Summen)	total	% total
vonEigBew*	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	von Eigentümer*in bewohnt		
EigMitGefH*	173.427	34,03	35,27	175.592	34,45	35,29	2.165	Eigentum: mit aktuell geführtem Haushalt		
EigOhnGefH*	4.177	0,82	0,85	4.177	0,82	0,84	0	Eigentum: ohne aktuell geführtem Haushalt		
VermWhZweck*	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	Zu Wohnzwecken vermietet		
VerMitGefH*	282.117	55,36	57,38	285.845	56,09	57,45	3.728	Vermietet: mit aktuell geführtem Haushalt		
VerOhnGefH*	8.830	1,73	1,80	8.830	1,73	1,77	0	Vermietet: ohne aktuell geführtem Haushalt		
FerFreiWhg*	37	0,01	0,01	37	0,01	0,01	0	Ferien- und Freizeitwohnung		
Leerstand*	23.107	4,53	4,70	23.107	4,53	4,64	0	Leerstehend		
DiplStreitW*	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	Diplomaten-/Streitkräftekwohnung		
GewerbNutz*	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	Gewerbliche Nutzung		
with	491.695	96,48	100,00	497.588	97,64	100,00	5.893	alle Wohnungen: mit aktuell geführtem Haushalt		
without	17.937	3,52	3,65	12.044	2,36	2,42	-	alle Wohnungen: ohne aktuell geführtem Haushalt		
<b>INSGESAMT</b>	<b>509.632</b>	<b>100,00</b>	<b>103,65</b>	<b>509.632</b>	<b>100,00</b>	<b>102,42</b>	-	alle Wohnungen: insgesamt		
Mit geführ. Haushalt	455.544	89,39	92,65	461.437	90,54	92,73	5.893	Eigentum/Vermietet: mit aktuell geführ. Haushalt		
Ohne geführ. HH / leer	36.114	7,09	7,34	36.114	7,09	7,26	0	Eigentum/Vermietet: ohne akt. geführ. HH / leer.		

Gebiet: Rechteck um digitale Verwaltungsgrenzen von Wuppertal, Velbert und Solingen, Abkürzung HH: Haushalt

\*Attributs-/Spaltenbezeichnung im remapped Dataframe für Merkmalsausprägung, max. 10 Zeichen für Shapefile-Kompatibilität

**Tabelle 5.6** Heiztyp-Häufigkeiten für Wohnungen und Gebäude im Wahlgebiet im Vergleich

Für die insgesamt 509.632 Wohnungen ist je nach gesetztem Schwellenwert in ca. 96,5 bzw. 97,6 % der Fälle eine Nutzung nach Belegung durch Haushalte erfasst. Von den mit diesem Merkmal erfassten Wohnungen sind ungefähr 92,7 % mit geführtem Haushalt (grüne

Kennzeichnung) und ca. 7,3 % ohne bzw. leer stehend (rote Kennzeichnung). Auffallend ist, dass alle Anzahl-Werte für Ausprägungen, welche unbewohnte Wohnungen repräsentieren, mit der Qualitäts-Angabe 0 angegeben sind.

Es wurden in der untersuchten Region keine Wohnungen erfasst, welche nach Ausprägungsdefinition von Eigentümer\*innen bewohnt werden, zu Wohnzwecken vermietet wurden(?), gewerblich genutzt werden oder Diplomaten-/Streitkräftewohnungen darstellen. Die erfassten Ferien- und Freizeitwohnungen machen mit 0,1 Promille aller Wohnungen einen vernachlässigbaren Teil aus. Wohnungs-Anzahlen, welche einer der in diesem Absatz genannten Merkmals-Ausprägungen zugehören wurden daher hell ausgegraut.

Tendentiell ist davon auszugehen, dass die Realisierungschancen für energetische Sanierung bei vergleichbaren Wohnungen mit geführtem Haushalt höher sind für Eigentumswohnungen gegenüber Mietwohnungen. In der untersuchten Region ist das Verhältnis von Miet- gegenüber Eigentumswohnungen jedoch stärker als im bundesdeutschen Schnitt ausgeprägt, was sich nachteilig auf Anreizmechanismen für energetische Modernisierungsmaßnahmen auswirkt. (Vergleich Unterunterabschnitt 2.1.1.1, Sektion über die Eigentumsstruktur des deutschen Wohnungsbestands)

### 5.3.2 Zensusdaten visuelle Auswertung in QGIS

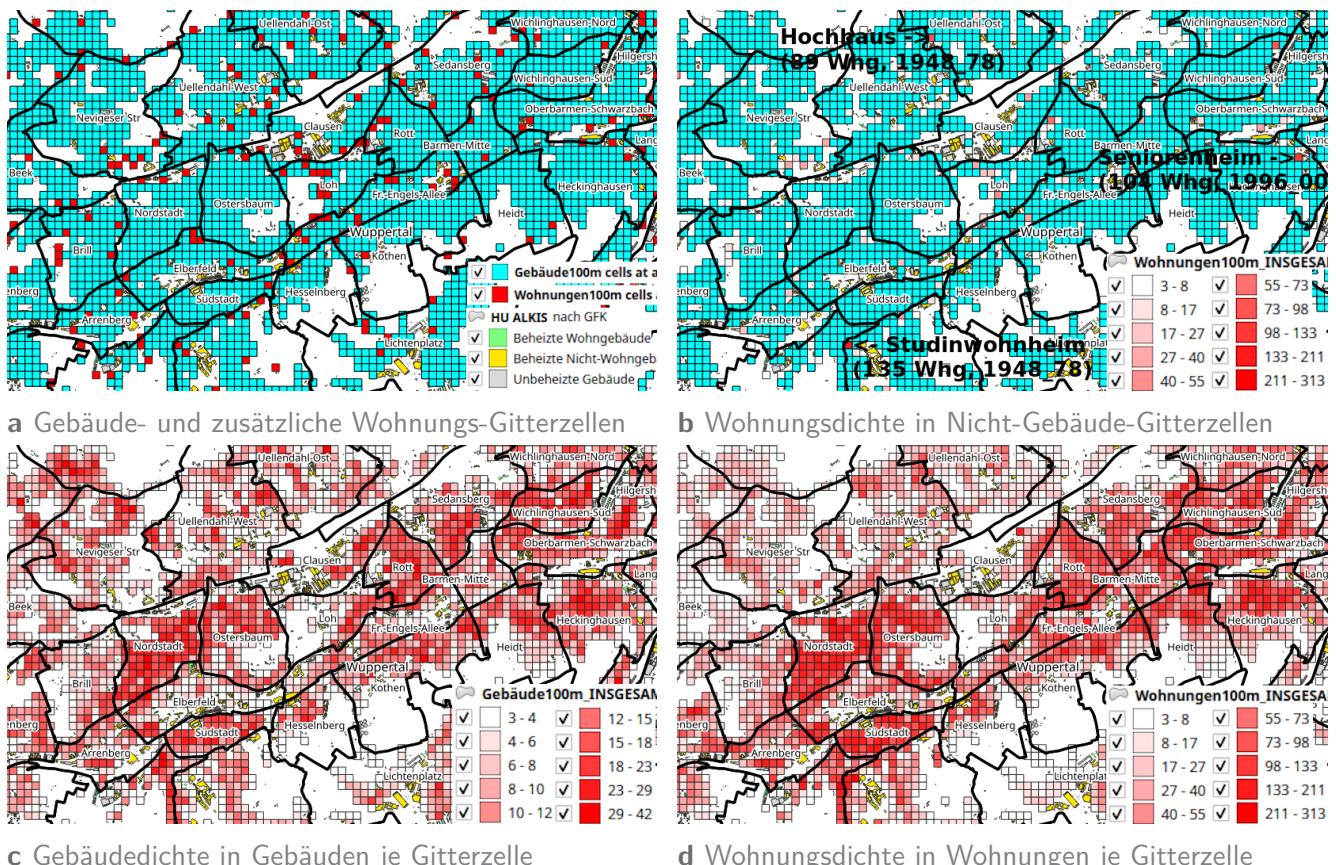
Eine vorläufige Betrachtung der Gesamtzahl an Einheiten (Wohnungen bzw. Gebäuden) und Gitterzellen im verwendeten Gebiet (Rechteck um DVG von Solingen, Wuppertal und Velbert) in beiden Datensätzen zeigt eine kleine Differenz in der räumlichen Abdeckung. Im genannten Gebiet entfallen die 181.592 erfassten Gebäude auf insgesamt 20.350 Gitterzellen, die 509.632 Wohnungen allerdings auf 22.732 Gitterzellen. Der Wohnungsdatensatz umfasst also 2.382 (ca. 11,7 %) mehr Gitterzellen. Im Vergleich zum Hausumringe Datensatz des ALKIS mit 219.897 Hausumringen des Typs beheizte Wohngebäude im gleichen Gebiet sind im Zensus-Datensatz nur 181.592 Gebäude erfasst wurden, also 38.305 weniger.

#### Räumliche Abdeckung und Gebäude-/Wohnungsdichten in QGIS:

In Abbildung 5.5 sind die räumlichen Abdeckungen der Zensus Gebäude- und Wohnungsdaten und die Gebäude- und Wohnungsdichten für mehrere Quartiere Wuppertals gezeigt. Zusätzlich zu den Zensus-Gitterzellen sind Quartiersgrenzen und Hausumringe des ALKIS angezeigt, letztere entsprechend der eigenen Einteilung nach GFK-Typen farblich hervorgehoben. Jene Hausumringe, welche nicht in Zensus erfassten Gitterzellen liegen, sind überwiegend vom Typ beheizter Nicht-Wohngebäude (gelb) oder vom Typ unbeheizter Gebäude (hellgrau).

Abbildung 5.5a zeigt in rot die Abdeckung des Wohnungs-Datensatzes und als darüber liegendes Layer in türkis die Abdeckung des Gebäude-Datensatzes. Bei einer Darstellung des Layers für Gebäudedaten zeigte sich, dass es Gitterzellen im Wohnungsdatensatz gibt, welche nicht im Gebäudedatensatz erfasst sind, aber nicht vice versa.

In Abbildung 5.5b ist zu erkennen, dass die Wohnungsdichte in den zusätzlichen Gitterzellen in der Regel eher gering ist. Drei Ausnahmen von Gitterzellen mit relativ hoher Wohnungsdichte, welche nicht im Gebäudedatensatz auftauchen wurden textuell hervorgehoben. Diese beinhalten bei näherer Untersuchung und Vergleich mit den Hausumring Daten des ALKIS (alternativ des



**Abbildung 5.5** Zensus Gebäude- und Wohnungsdaten, Abdeckung und Dichte in Teilgebiet Wuppertals

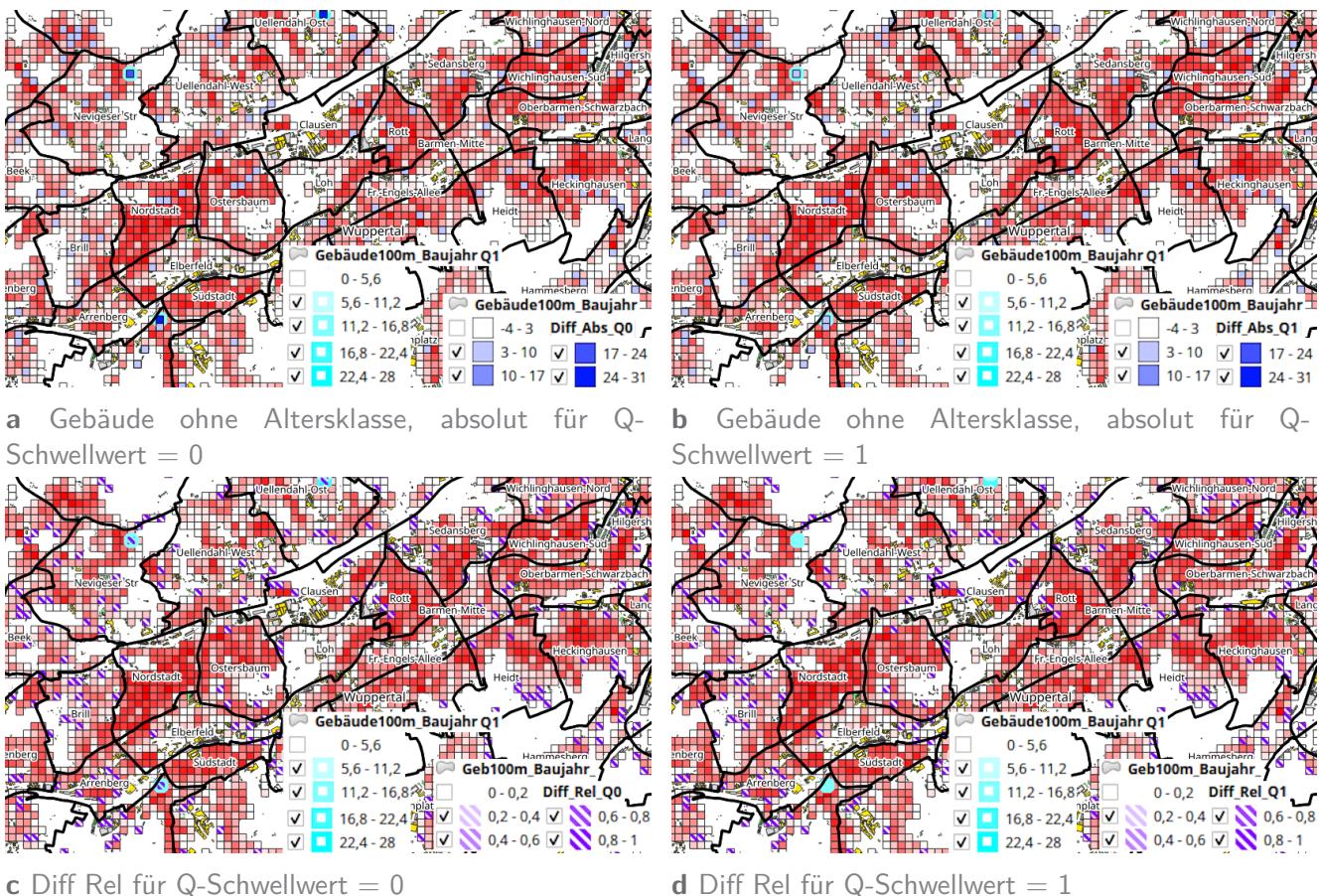
LANUV) ein Hochhaus mit 89 Wohnungen, ein Seniorenheim mit 101 Wohnungen beziehungsweise ein Studiwohnheim mit 135 Wohnungen.

Beim Vergleich der Gebäudedichte in Abbildung 5.5c und der Wohnungsdichte in Abbildung 5.5d ist zu erkennen, dass beide Dichten im innerstädtischen Gebiet hohe Werte aufweisen (Ballungsräume) und überwiegend korrelieren. Diese Korrelation zeigt sich nicht so stark in den äußeren Stadtgebieten. In ist bei den Wohnungsdichten eine deutliche Abnahme gegenüber innerstädtischen Gebieten zu erkennen. Dies gilt in den Außengebieten der Stadt auch für Gitterzellen, welche eine relativ hohe Gebäudedichte aufweisen. Die äußeren Stadtgebiete sind stärker geprägt von in kleinerer Zahl bewohnten Wohngebäuden. Eine detailliertere Untersuchung der Gebäudedichte nach im Zensus erfassten Merkmalen wie der Gebäudeart, Gebäudetypbauweise und Gebäudetypgröße ist nicht erfolgt. Auszugehen ist von einer größeren Dominanz von Einfamilienhäusern (EFH), Reihenhäusern (RH) und Mehrfamilienhäusern (MFH) in äußeren Stadtgebieten gegenüber innerstädtischen, in welchen vorraussichtlich auch vermehrt Groß-Mehrfamilienhäuser (GFH) vorliegen.

#### Qualität und Vollständigkeit der Altersklassen-Daten im Zensusdatensatz:

In Abbildung 5.6 wurden die Differenzen von insgesamt erfassten Gebäuden und mit Altersklasse erfassten Gebäuden in den reformatierten (remapped) Zensus-Gebäudefeldern gezeigt. Bei den mit

Altersklasse erfassten Gebäude werden nur solche gezählt, deren Qualitäts-Angabe kleiner-gleich dem gesetzten Schwellenwert  $Q$  entspricht. Die Höhe dieser Differenz wird in Gitterzellen sowohl absolut (blaue Füllung) als auch relativ (lila Schraffierung) (zur Gesamtzahl an Gebäuden) markiert. Markiert sind nur solche Zellen, in jenen die Differenz absolut größer-gleich 3 oder relativ größer-gleich 20 % beträgt. Die rote Schattierung der Gitterzellen spiegelt wie in Abbildung 5.5c die Gebäudedichte wider. Zusätzlich wurden Gitterzellen in welchen mehr als 5 Altersklassen-Angaben die Qualität 1 (starke Abweichung) besitzen mit türkiser Umrandung hervorgehoben. Dies dient zur Kennzeichnung von Gitterzellen mit geringerer Datenqualität und zur Darstellung, inwieweit die Datenlücken (hohe absolute Differenzwerte) bei den Altersklassen-Angaben durch Mit-Berücksichtigung Daten schlechterer Qualität ausgeglichen werden können.



**Abbildung 5.6** Zensus Gebäudedaten: Qualität der Altersklassen-Angaben in Teilgebiet Wuppertals

Im Vergleich von Abbildung 5.6a und Abbildung 5.6b ist zu erkennen, dass die drei Gitterzellen mit hoher großer Anzahl an Altersklassenangaben mit Qualität 1 (türkise Umrandung) auch jene sind, die beim gesetzten Qualitäts-Schwellenwert 0 die höchsten absoluten Differenzen aufzeigen. Bei Hochsetzen des Qualitäts-Schwellenwert auf 1 verringert sich deren absolute Differenz deutlich.

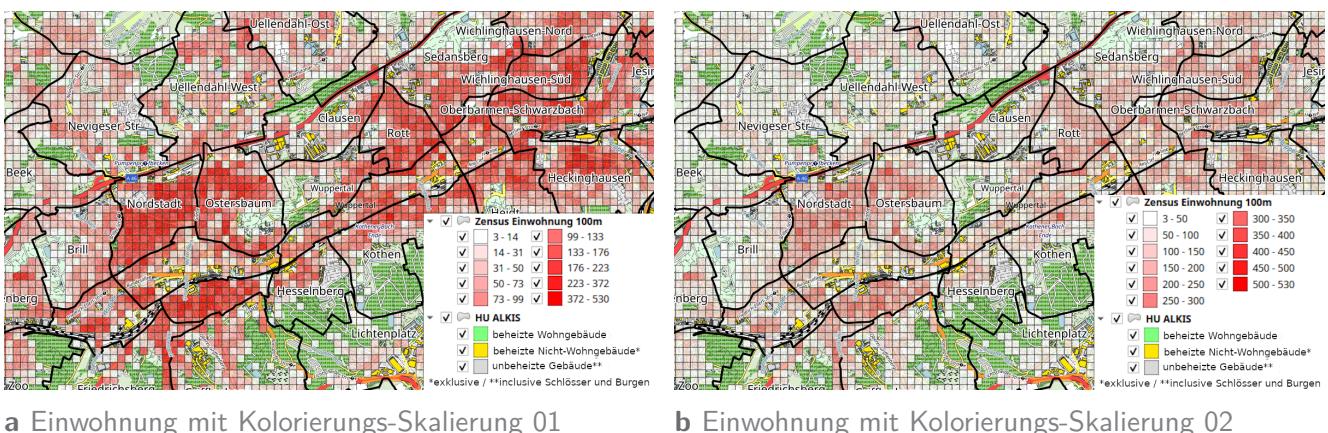
Eine ähnliche Minimierung der relativen Differenz für die drei türkis umrandeten Gitterzellen lässt sich im Vergleich von Abbildung 5.6c und Abbildung 5.6d feststellen. Bei dieser Form der Darstellung der relativen Differenz ist zu erkennen, dass hohe relative Differenzen überwiegend in

gering bebauten Gitterzellen (weiße bis hellrote Gitterzellen mit geringer Gebäudezahl) auftreten. In dicht bebauten Gitterzellen ist auch die relative Differenz in der Regel gering (kaum lila Schraffierungen).

### Einwohnung: Einwohner\*innen-Anzahl je Gitterzelle

Abbildung 5.7 zeigt die Einwohnungs-Daten des Zensus für einen Ausschnitt Wuppertals mit zwei unterschiedlichen Kolorierungs-Skalierungen für die Farbgebung der Einwohner\*innenanzahl je Gitterzelle. Das Layer ist semitransparent mit Deckungskraft 80 % dargestellt. Darunter liegend befindet sich ein Layer mit Hausumringen des ALKIS mit Farbgebung je GFK-Typ. Als Baselayer wurden OSM-Layer verwendet. Als Overlay-Layer sind die Quartiers-Grenzen mit Bezeichnung eingeblendet.

Abbildung 5.7a zeigt die Einwohnung in einer größer werdenden Staffelung je dichter Gitterzellen bewohnt sind. Abbildung 5.7b zeigt die Einwohnung des selben Kartenausschnitts in einer linear verlaufenden Staffelung (in 50-Einwohner\*innen-Schritten), abgesehen vom unteren und oberen Ende der Staffelung. Die erste Darstellungsform bietet sich insbesondere für Wärmeplanungen in weniger dicht bewohnten Gebieten an, die zweite für dichter bewohnte Gebiete.

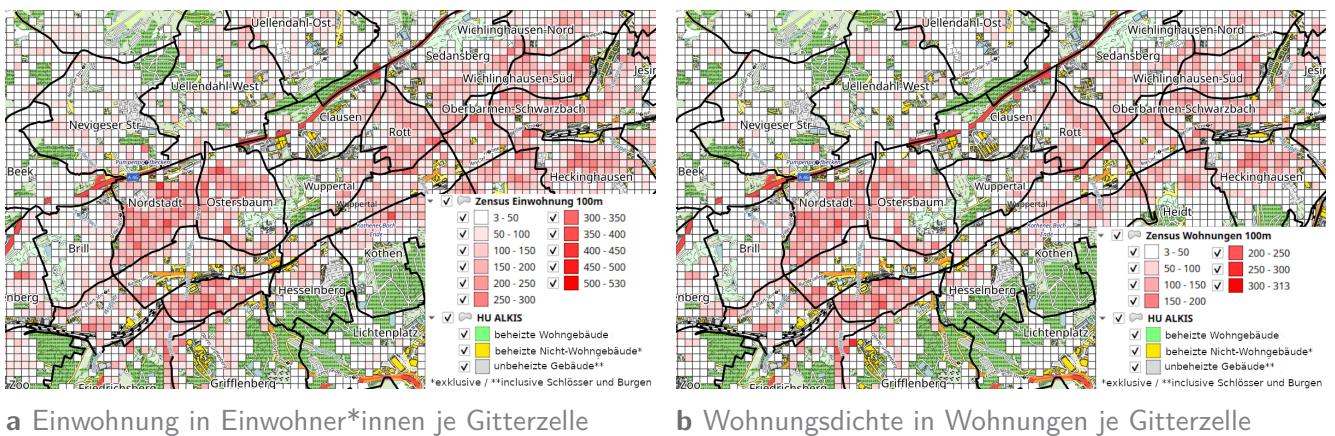


**Abbildung 5.7** Zensus Einwohnungsdaten: Einwohner\*innen je Gitterzelle in Teilgebiet Wuppertals

Bei einem direkten Vergleich der Einwohner\*innendichte und der Wohnungsdichte mit linearer Staffelung zeigt sich eine ähnliche Verteilung. Abbildung 5.8 zeigt beide Dichten für den gleichen Teilausschnitt Wuppertals. Die Dichte-Layer sind in diesem Beispiel zur besseren Erkennbarkeit non-transparent dargestellt.

### Heiztyp Fernwärme im Zensus Wohnungsdatensatz

... Fernwärmennetz der WSW taucht nicht im Zensus-Datensatz auf. Vereinzelte Gitterzellen mit Fernwärme-Nutzung. ...



a Einwohner\*innen je Gitterzelle

b Wohnungsdichte in Wohnungen je Gitterzelle

**Abbildung 5.8** Zensus Einwohnungs- und Wohnungsdaten: Dichte-Vergleich in Teilgebiet Wuppertals

## 5.4 Raumwärme-Bedarfsmodell [LANUV]

Tabelle 5.7 zeigt die Zeit zum Herunterladen, Entpacken, Laden, Zusammenfügen der Shapefiles für das Raumwärmebedarfsmodell für Hausumringe und Wärmeliniendichten des LANUV für 26 Gemeinden inklusive Zuschnitt, sowie die Schreibzeit der zugeschnittenen Daten in zwei Geopackages.

Raumwärme-Bedarfsmodell [LANUV]	Zeit für Spatial Extent GDF aus DVGs	Download Zip-files & Extract .shp's	Extracted .shp's für 26 Gemeind.	Lesen, Kombinieren, Zuschnitt	Anzahl Haus Umringe	Ausgangsdaten Hausumringe .gpkg Dateigröße Zeit	Ausgangsdaten Wärmeliniendichte .gpkg Dateigröße Zeit	Gesamt Zeit
Aus Rohdaten	< 4 s	ca. 1 min 20 s	ca. 1,3 GB	ca. 4 min 30 s	507.485	ca. 250 MB ca. 2 min	ca. 15 MB ca. 10 s	ca. 8 min
Aus Cropdaten*	-	-	-	ca. 2 min	507.485	- -	- -	ca. 2 min

\*.gpkg zum Einlesen verwendet

Anmerkung: Zuschnitt der 26 Gemeindegebiete mit (Teil-)Fläche im Rechteck um DVG von Wuppertal, Velbert, Solingen auf besagtes Rechteck

**Tabelle 5.7** RWB LANUV: Download, Lese, Kombinier-, Zuschnitts- und Schreibzeiten, In- und Output-Dateien

## 5.5 Erzeugungs-Anlagen Strom, Wärme [LANUV]

Die Zeiten zum Einlesen, Zuschneiden, gegebenenfalls Hinzufügen von aus PLZ abgeleiteten Geo-Koordinaten und Schreiben der Anlagen-Standort aus dem Datensatz des LANUV sind in Tabelle 5.8 gelistet.

Hausumringe [ALKIS]	Zeit für Spatial Extent GDF aus DVGs	Inputdaten (NRW) Dateigröße	Anzahl Layer/ Sheets	Output .gpkg Dateigröße	Anzahl Layer	Zeit Einzeln	Zeit Gesamt
Input .gdb	ca. 6 s	ca. 555 MB	325	ca. 18,5 MB	14	ca. 5 s	ca. 44 s
Input .xlsx		ca. 1,6 MB	22		2	ca. 33 s*	

Anmerkung: Zuschnitt auf Rechteck um DVG von Wuppertal, Velbert, Solingen mit bbox=gdf\_spatial\_extent, engine=fiona

\*Zeit größtenteils für Ableitung von Koordinaten aus PLZ mittels python libraries pgeocode oder geopy

**Tabelle 5.8** EE-NRW: Lese-, Georeferenzierungs- und Schreibzeiten, In- und Output-Dateien

Insgesamt gibt es im zugeschnittenen Datensatz Standorte für 21 Biomasse-, 1 Deponiegas-, 3 Erdgas-, 9 Klärgas-, 1 Mineralöl-, 2 Müllverbrennungs-, 11 PV-Freiflächen-, 605 PV-Dach-, 17 Wasserkraft-, 20 in Betrieb befindliche Windkraft- und 2 genehmigte Windkraft-Anlagen sowie 1 KWK-relevanten Industriestandort und 91 Standorte mit industrieller Abwärme.

### **Überprüfung der räumlichen Zuschneidung auf Korrektheit:**

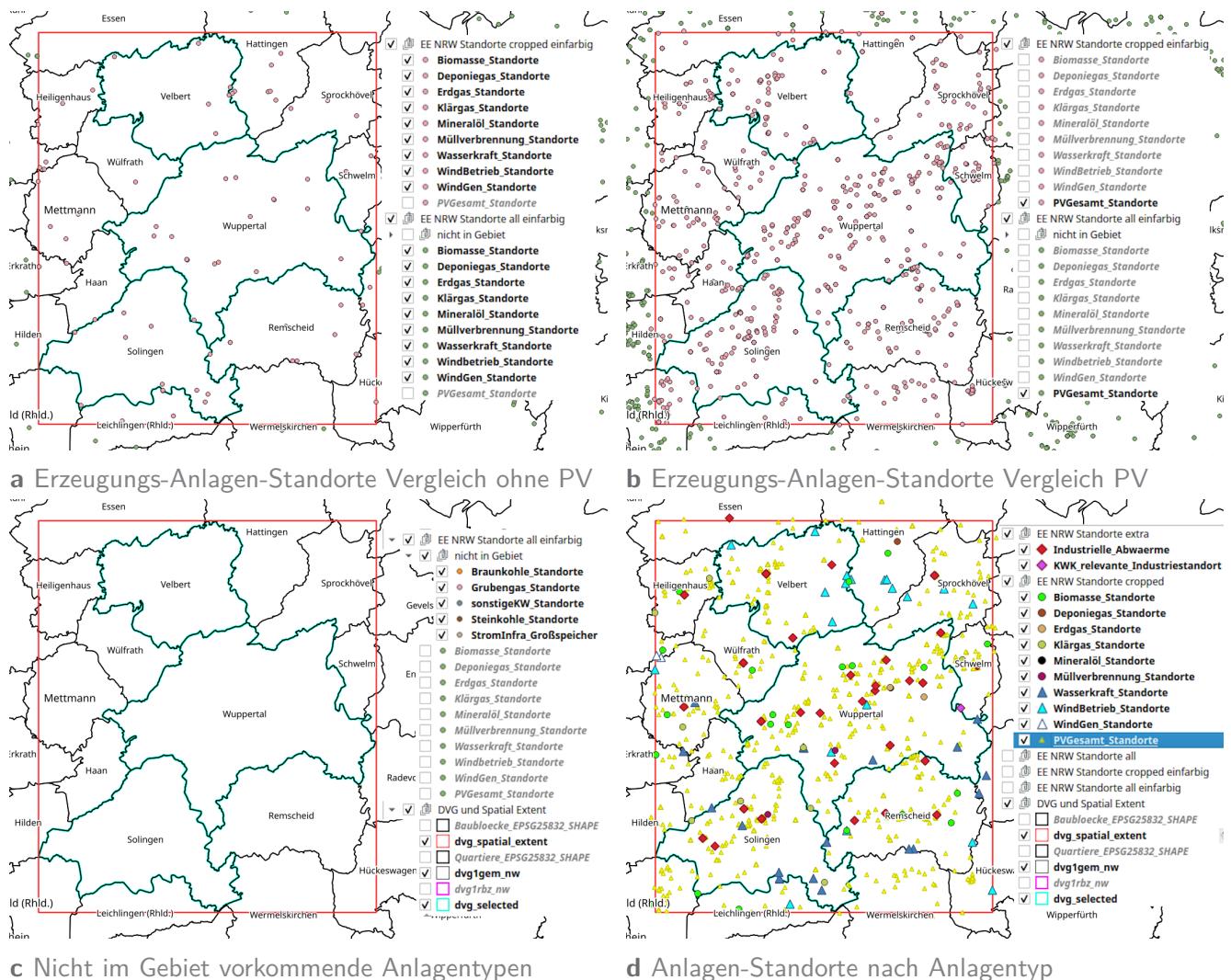
Um das Zuschneiden der Standort-Daten von Anlagen auf Korrektheit zu überprüfen, wurden die nicht zugeschnittenen Rohdaten mit den Ausgangsdaten in QGIS verglichen. Abbildung 5.9 zeigt in Abbildung 5.9a die Überlagerung der Anlagen-Standorte ohne PV und in Abbildung 5.9b von PV-Anlagen der Ausgangsdaten (rosa) und der Rohdaten (grün). Zu erkennen ist, dass keine Anlagen fälschlicherweise weggeschnitten wurden (keine grünen Markierungen im untersuchten Gebiet), vereinzelt allerdings Anlagen in den Ausgangsdaten auftauchen, welche außerhalb des Gebiets sind und nicht korrekt heraus geschnitten wurden. Beim Rauszoomen zeigte sich, dass 3 PV-Anlagen über 2 km Entfernung zum rot markierten Rechteck aufwiesen und bis zu 50 km entfernt lagen.

Für Layer aus den Rohdaten, welche keine Anlagen im untersuchten Gebiet vorweisen, wurden keine Dateien erstellt, da Geodataframes ohne Einträge nicht gespeichert werden können. Ein Vergleich dieser exkludierten Layer in Abbildung 5.9c zeigt, dass diese wirklich keine Anlagen im untersuchten Gebiet beinhalten. Eine Darstellung aller zugeschnittener Layer mit Anlagen-spezifischer Markierung inklusive der georeferenzierten und zugeschnittenen Layer für industrielle Abwärme und KWK-relevante Standorte sind in Abbildung 5.9d gezeigt. Erzeugungs-Anlage-Standorte mit Wärmeproduktion sind mit Kreisen, mit außschließlich Stromproduktion mit Dreiecken und Anlagen mit industrieller Abwärme und KWK-relevante Anlagen mit Rauten gekennzeichnet, je nach Typ in unterschiedlicher Kolorierung. Auch für diese zwei Layer mit eigens georeferenzierten Daten funktioniert der Zuschnitt auf das gewählte Gebiet (hier nicht dargestellt). Eine Extra-Überprüfung wurde durchgeführt, da der Zuschnitt nicht beim Einlesen in einen Geodataframe mittels *engine = fiona* als Argument, sondern mit der Geodataframe-Methode *.cx* durchgeführt wurde.

### **Untersuchung der KWK-relevanten Standorte und Industrielle Abwärme Standorte:**

Der eine KWK-relevante Standort, das türkise Karo im rechten mittleren Kartenabschnitt, ist der Werksstandort des Papierherstellers Erfurt und Sohn KG Wuppertal, deren jährlicher Prozesswärmeverbrauch mit 53,9 GWh/a angegeben wird. Detailliertere Informationen zum benötigten Temperaturniveau sind jedoch nicht gegeben.

Von den 91 potentiellen Standorten für industrielle Abwärme sind 31 mit Abwärme-, Leistungs-, Temperatur- und Laufzeitangaben. Unternehmensbezeichnungen, PLZ, Ort, Beschreibungstext sind für alle Unternehmen gegeben. Das Abwärmepotential wird in neun Fällen mit < 100 MWh/a, in acht Fällen mit  $\geq 100 - 1.000$  MWh/a, in elf Fällen mit  $\geq 1.000 - 10.000$  MWh/a, in zwei Fällen mit  $\geq 10.000 - 100.000$  MWh/a und in einem Fall mit  $\geq 100.000$  MWh/a angegeben. Das größte angegebene Potential liegt dabei beim Kalkwerk der Rheinkalk GmbH Werk Flandersbach (in Wülfrath) und die beiden zweitgrößten Potentiale bei dem Kalkwerk H. Oetelshofen GmbH & Co. KG (in Wuppertal Vohwinkel) und Leichtmetallgießerei Borbet Solingen GmbH (in Solingen Merscheid).



**Abbildung 5.9** Standorte für Energie-Erzeugung Strom, Wärme und für industrielle Abwärme und KWK-relevante Standorte im zugeschnittenen Gebiet

Zur Prüfung der Standortgenauigkeit wurde noch eine Stichprobe um den Stadtteil Barmen herum vorgenommen und vier angezeigte Standorte untersucht. Die untersuchten Standorte gehörten zu den Unternehmen Membrana GmbH, Stannol GmbH, Axalta Coating Systems GmbH und RWE Energiedienstleistungen GmbH. Der Reihe nach wurde eine kurze Recherche zum Unternehmen durchgeführt, der Standort anhand der Angaben auf der Firmen-Webseite, dem angegebenen Standort auf Google Maps mit Satellitenbild-Anzeige zur Überprüfung oder anhand eigenen Wissens abgeglichen.

Von den vier Standorten lag nur einer in unmittelbarer Nähe zum realen Standort mit einem Abstand von ca. 500 m bei der Axalta Coating GmbH in Wuppertal Hatzfeld. Ein angezeigter Standort lag in relativ großer Nähe zum realen Standort mit einem Abstand von ca. 1,5 km bei dem Eintrag RWE Energiedienstleistungen GmbH BHKW Wuppertal Hilgershöhe, bedingt durch das große PLZ-Gebiet (42277, Oberbarmen). Die Online-Recherche hat allerdings ergeben, dass

das Unternehmen zwischen 2016 und 2017 rechtskräftig von (der RWE-Tochterfirma) Innogy SE übernommen wurde, obgleich der Stand der Daten mit Dezember 2018 angegeben war. Das BHKW versorgt dort ein kleines Fernwärmennetz. [63]

Der angezeigte Standort des Unternehmens Stannol GmbH in Barmen ist veraltet. Der Adressstandort des Unternehmens Stannol GmbH & Co. KG liegt laut Anfahrtsbeschreibung auf deren Webseite in der Haberstraße 24, 42551 Velbert. Der Firmenstandort wurde 2015 von Wuppertal nach Velbert verlegt. [31]

Auch für das Unternehmen Membrana GmbH ist der Standort nicht ganz richtig. Das Unternehmen gehört inzwischen zu 3M und liegt nicht in Barmen sondern zwischen Heckinghausen und Rauental. [eigen]

Prinzipiell bietet der Datensatz gute Anhaltspunkte für Firmen in der Umgebung. Für die Abschätzung real erschließbarer industrieller Abwärme potentielle zur lokalen Wärmeversorgung sind jedoch detailliertere Untersuchungen entsprechend der lokalen Begebenheiten mit weiteren Referenzen notwendig. Standorte wie das Werk der Bayer AG im Westen Wuppertals oder Produktionsstätten von Vorwerk wie die der Vorwerk Autec GmbH & Co. KG in Wuppertal Lichtscheid tauchen im Datensatz beispielsweise nicht auf.

**Korrektur:** Wie in Unterabschnitt 4.4.8 beschrieben, liegen für die Industriellen Abwärme Standorte genaue Geokoordinaten vor. Die obige Überprüfung der Standortgenauigkeit ist veraltet. Insgesamt liegen im zugeschnittenen Gebiet 93 Standorte und die Standorte für Membrana GmbH (inzwischen 3M), RWE Energiedienstleistungen GmbH BHKW Wuppertal Hilgershöhe (inzwischen Innogy SE) und Axalta Coating GmbH sind korrekt. In Abbildung 5.9 sind noch die aus der Postleitzahl abgeleiteten Geokoordinaten für Industrielle Abwärme Standorte zu sehen.

## 5.6 Hausumringe mit Merkmals-Zuweisung aus Zensus-Gebäudedaten

Die benötigten Zeiten zum Einlesen der ALKIS Hausumring- und Zensus Gebäudedaten, zum Zuweisen der Zensus-Merkmale zu Hausumringen und Speichern der Ausgangsdaten sind inklusive Dateigrößen in Tabelle 5.9 gezeigt.

HU Merkmals-Zuweisung	Input-Daten* Zensus-Geb.	Input-Daten* HU ALKIS	Zuweisung BAUJAHR MZ	Zuweisung HEIZTYP	Output .shp	Output .gpkg	Gesamt Zeit
Dateigröße / Anzahl	ca. 3,8 MB	ca. 154 MB	ca. 146.000	ca. 157.000	ca. 260 MB	ca. 154 MB	-
Zeit	ca. 3 s	ca. 1 min	ca. 10 min	ca. 10 min	ca. 6 min	< 2 min	< 30 min

\*.gpkg verwendet mit präprozessierte Daten für die Region im Rechteck um DVG von Wuppertal, Velbert, Solingen, Zensus Q-Schwellenwert = 0

**Tabelle 5.9** HU-Merkmals-Zuweisung: Lese-, Bearbeitungs- und Schreibzeiten, In- und Output Dateigrößen und -formate

Zensus-Merkmale wurden nur Hausumringen zugewiesen, deren Zensus-Flag gesetzt ist, das heißt, deren GFK dem Typ beheizte Wohngebäude entspricht. Von den insgesamt 219.897 Hausumringen diesen Typs, konnten so 146.419 eine Altersklasse und 157.434 ein Heiztyp zugewiesen werden. Das sind ca. 66,59 % bzw. ca. 71,59 % der Hausumringe diesen GFK-Typs. Die Zahlen hierfür sind in Tabelle 5.10 gezeigt.

TYP		GFK	GFK_text			n_hu	perc_hu	perc_typ	with_BAUJAHR	perc_wit_BAUJAHR	with_HEIZTYP	perc_with_HEIZTYP
<b>BEHEIZTE WG</b>	<b>zensus = 1, alt_id = 1</b>	31001_1010	Wohnhaus			196.337	37,05	89,29	131.059	66,75	141.164	71,90
		31001_1000	Wohngebäude			6.807	1,28	3,10	4.696	68,99	4.931	72,44
		31001_1120	Wohngebäude mit Handel und Dienstleistungen			6.175	1,17	2,81	4.581	74,19	4.721	76,45
		31001_1100	Gemischt genutztes Gebäude mit Wohnen			4.380	0,83	1,99	2.501	57,10	2.756	62,92
		31001_1130	Wohngebäude mit Gewerbe und Industrie			3.769	0,71	1,71	2.717	72,09	2.784	73,87
		Top 5	<b>BEHEIZTE WOHNGBÄUDE: SUB-SUMME</b>			217.468	41,03	98,90	145.554	66,19	156.356	71,10
		alle 20	<b>BEHEIZTE WOHNGBÄUDE: TYP-SUMME</b>			<b>219.897</b>	<b>41,49</b>	<b>100,00</b>	<b>146.419</b>	<b>66,59</b>	<b>157.434</b>	<b>71,59</b>

Datenquelle: Hausumringe ALKIS, Zuschnitt auf Rechteck um Bounds der Digitalen Verwaltungsgrenzen von Wuppertal, Velbert und Solingen, Zensus 2011 Gebäudedaten (q = 0)

**Tabelle 5.10** Anzahl der Hausumringe mit zugewiesener Altersklasse für GFK mit zensus-flag = 1

BAUJAHR_MZ	Zensus Gebäude			Hausumringe ALKIS		
	total	% total	% with	total	% total	% with
BauVor1919	26.213	14,44	<b>17,16</b>	25.255	11,48	<b>17,25</b>
Bau1919_48	17.882	9,85	<b>11,71</b>	17.143	7,80	<b>11,71</b>
Bau1948_78	78.969	43,49	<b>51,70</b>	75.607	34,38	<b>51,64</b>
Bau1979_86	11.362	6,26	<b>7,44</b>	10.900	4,96	<b>7,44</b>
Bau1987_90	3.185	1,75	<b>2,08</b>	3.047	1,39	<b>2,08</b>
Bau1991_95	4.198	2,31	<b>2,75</b>	3.972	1,81	<b>2,71</b>
Bau1996_00	4.562	2,51	<b>2,99</b>	4.344	1,98	<b>2,97</b>
Bau2001_04	3.466	1,91	<b>2,27</b>	3.335	1,52	<b>2,28</b>
Bau2005_08	2.244	1,24	<b>1,47</b>	2.162	0,98	<b>1,48</b>
BauNac2008	678	0,37	<b>0,44</b>	654	0,30	<b>0,45</b>
with	<b>152.759</b>	<b>84,12</b>	<b>100,00</b>	<b>146.419</b>	<b>66,59</b>	<b>100,00</b>
without	<b>28.833</b>	<b>15,88</b>	<b>18,87</b>	<b>73.478</b>	<b>33,41</b>	<b>50,18</b>
<b>INSGESAMT</b>	<b>181.592</b>	<b>100,00</b>	<b>118,87</b>	<b>219.897</b>	<b>100,00</b>	<b>150,18</b>

HEIZTYP	Zensus Gebäude			Hausumringe ALKIS		
	total	% total	% with	total	% total	% with
Fernwärme	3.219	1,77	<b>1,95</b>	2.921	1,33	<b>1,86</b>
EtagenHeiz	25.032	13,78	<b>15,16</b>	23.471	10,67	<b>14,91</b>
BlockHeiz	689	0,38	<b>0,42</b>	555	0,25	<b>0,35</b>
ZentrHeiz	136.113	74,96	<b>82,43</b>	130.423	59,31	<b>82,84</b>
1+Raumöfen	0	0,00	<b>0,00</b>	0	0,00	<b>0,00</b>
KeineHeiz	79	0,04	<b>0,05</b>	64	0,03	<b>0,04</b>
with	<b>165.132</b>	<b>90,94</b>	<b>100,00</b>	<b>157.434</b>	<b>71,59</b>	<b>100,00</b>
without	<b>16.460</b>	<b>9,06</b>	<b>9,97</b>	<b>62.463</b>	<b>28,41</b>	<b>39,68</b>
<b>INSGESAMT</b>	<b>181.592</b>	<b>100,00</b>	<b>109,97</b>	<b>219.897</b>	<b>100,00</b>	<b>139,68</b>

Vergleich der Häufigkeiten zugewiesener Merkmals-Ausprägungen bei Hausumringen gegenüber den originalen Zensus-Gebäudedaten  
Zensus-Qualitätsschwellenwert = 0  
Region = Rechteck um DVG von Solingen, Velbert, Wuppertal

**Tabelle 5.11** Häufigkeit von Altersklassen und Heiztypen im Zensus Gebäudesatz und bei zugewiesenen Hausumringen

Dem gegenüber stehen insgesamt 181.592 Gebäude, welche im Zensus im selben Gebiet erfasst wurden, davon 152.759 mit Altersklasse (ca. 84,12 %) und 165.132 mit Heiztyp (ca. 90,94 %). Das heißt von den im Zensus erfassten Anzahlen von Gebäuden mit jeweiligem Merkmal konnte nur ein Teil der Anzahlen von Merkmalsausprägungen einzelnen Hausumringen zugewiesen werden. Bei der Altersklasse sind dies 146.419 von 152.759 (ca. 95,85 %, absolut 6.340 weniger) und beim Heiztyp 157.434 von 165.132 (ca. 95,33 %, absolut 7.698 weniger). (s. Tabelle 5.11)

Der Großteil dieser Differenz ergibt sich aus dem implementierten Algorithmus für Gitterzellen, in welchen die Anzahl an Gebäuden mit jeweiligem Merkmal im Zensusdatensatz größer ist als die Anzahl an Hausumringen, denen diese zugewiesen werden sollen. (s. Unterabschnitt 4.5.1, Fall b)) Hieraus ergibt sich eine Nichtzuweisung von 6.101 Altersklassen in 3.130 Gitterzellen und 7.382 Heiztypen in 3.940 Gitterzellen. Bei Betrachtung der negativen absoluten Differenz-Werte von erfassten Gebäuden insgesamt und merkmals-erfassten Gebäuden im Zensus-Gebäudefdatensatz in ebenjenen Gitterzellen, so zeigt sich, dass diese summiert lediglich 1.101 bei Altersklassen bzw. 680 bei Heiztypen betragen. Diese im Zensus-Gebäudefdatensatz auftretenden 'virtuell' erfassten Gebäude mit Merkmalsausprägung, treten geheimhaltungsbedingt auf, wenn statt 2 Gebäuden einer Merkmals-Ausprägung 3 angegeben sind.

Das heißt, der Großteil der Nicht-Zuweisungen erfolgt, aufgrund eines Diskrepanz zwischen Gebäudezahl im Zensus-Datensatz und Anzahl von Hausumringen im ALKIS-Datensatz für die genannten 'Fall b)-Gitterzellen'. Die Fehl-Zuweisung könnte daran liegen, dass die Zuweisung von Gebäuden im Zensus-Datensatz anhand der Geo-Koordinaten des Hauseingangs, die Zuweisung von Hausumringen zu Gitterzellen im Tool jedoch anhand des Centroids, also des Flächenschwerpunktes, erfolgen. Der weitaus geringere Teil an Nicht-Zuweisungen erfolgt aus dem fehlen einer

korrespondierenden Zensus Gebäude-Gitterzelle.

Ein Vergleich der Liste von Gitterzellen im Zensus-Gebäudedatensatz und der Liste von Gitterzellen mit Hausumringen zeigt ebenfalls eine Diskrepanz in der Abdeckung. Von 36.248 Gitterzellen mit Hausumringen, enthalten 27.286 Zellen Hausumringe, deren Zensus-Flag gesetzt ist. Dem gegenüber stehen 20.350 Gitterzellen im Zensus-Gebäudedatensatz. Die Schnittmenge beider Listen beinhaltet 20.226 Gitterzellen. Die 124 Zensus Gebäude-Gitterzellen ohne korrespondierende Gitterzellen von Hausumringen mit gesetztem Zensus-Flag enthalten 415 Gebäuden. Die 7.060 Gitterzellen mit Hausumringen mit gesetztem Zensus-Flag ohne korrespondierende Zensus Gebäude-Gitterzelle enthalten insgesamt 16.856 Hausumringe mit gesetztem Zensus-Flag.

Insgesamt zeigt sich trotz nicht zugewiesener Merkmalsausprägungen eine hohe Zuweisungsrate von über 95 % und eine ähnliche Häufigkeitsverteilung der einzelnen Ausprägungen im Vergleich zum Zensus Gebäudedatensatz. Ein Vergleich der Häufigkeiten für die einzelnen Altersklassen und Heiztypen ist in Tabelle 5.11 gezeigt. Die Daten sind der autogenenerten Pre-Analyse-Dateien der Merkmals-Zuweisung-Routine des entwickelten Python-Tools entnommen.

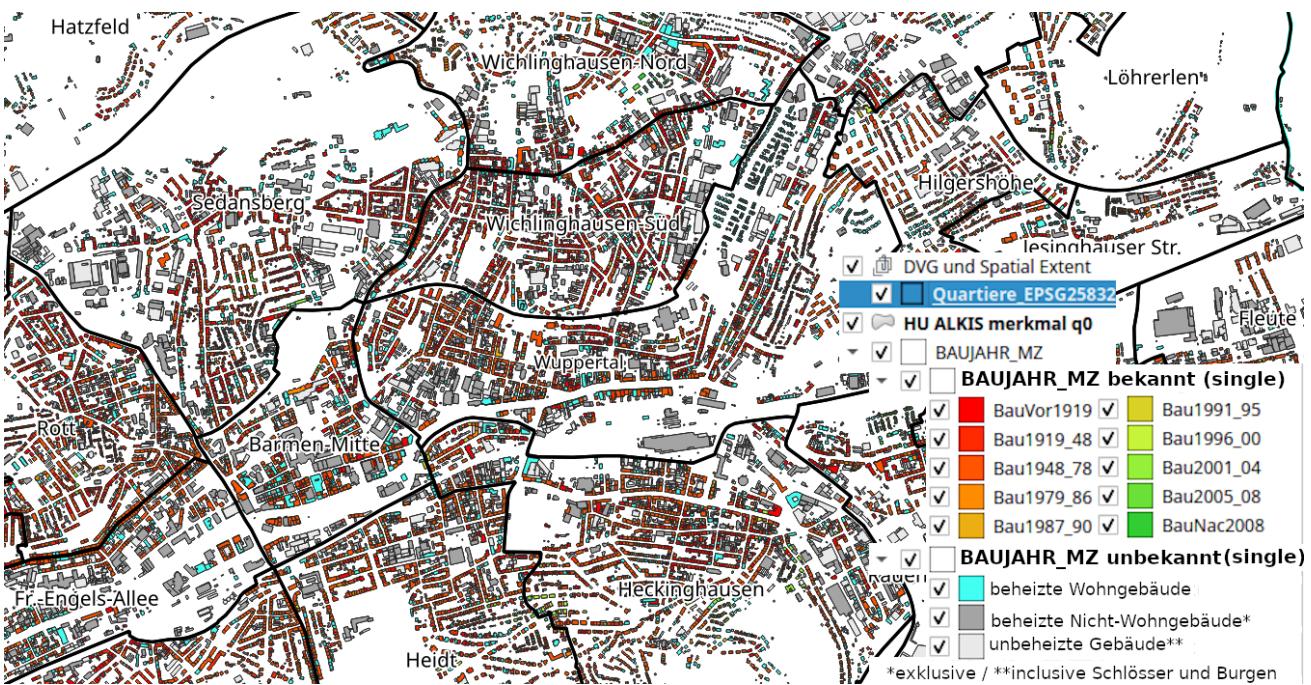
### Auswertung von Altersklassen-Zuweisungen in QGIS

Abbildung 5.10 zeigt einen Ausschnitt Wuppertals mit Quartiersgrenzen, -bezeichnungen und modifizierten Hausumringen aus dem ALKIS-Datensatz in Großansicht. Die Hausumringe sind farblich markiert je nach bekannter Baualtersklasse oder GFK-Typ bei unbekannten Baualtersklassen. Die Farbgebung für bekannte Baualtersklassen für beheizte Wohngebäude reicht von rot über orange, über hell grün bis dunkel grün (von alt nach neu). Die Farbgebung für Hausumringe unbekannter Baualtersklasse ist für beheizte Wohngebäude türkis, für beheizte Nicht-Wohngebäude grau und für unbeheizte Gebäude weiß, je nach GFK-Typ-Einteilung anhand der gesetzten Flags *zensus* und *alt\_rel*.

Zu erkennen ist eine große Dominanz alter Wohngebäuden (Altersklassen bis Baujahr 1978, Rottöne), welche größtenteils vor der ersten Wärmeschutzverordnung 1977 errichtet wurden. Nur vereinzelt sind neuere Wohngebäude mit Baujahr 1979 bis 1995 (Orangetöne) oder Wohngebäude-Neubauten mit Baujahr ab 1996 (Grüntöne) zu erkennen. Ebenfalls zu erkennen sind zahlreiche beheizte Nicht-Wohngebäude (grau) und Wohngebäude unbekannter Altersklasse (türkis).

Abbildung 5.11 zeigt einen kleineren Karten-Ausschnitt Wuppertals mit Teilen der Quartiere Wichlinghausen Süd und Oberbarmen Schwarzbach. Für die Hausumringe wurde die selbe Farbgebung zur Kennzeichnung der Altersklassen verwendet. Zudem wurden einige OSM-Layer als Basis-Layer verwendet, um zusätzliche Gebietsmerkmale anzuzeigen, unter Anderem Straßenzüge, Wohngebiete (hellgrau), Schulgelände (hellblau), Grünflächen-Parks (hellgrün), Waldgebiete (grün mit Baumsymbolen) und Auto-Parkgebäude/-flächen (dunkelgrün). Als Overlay sind die Ränder von Gitterzellen im Zensus Gebäudedatensatz mit eingezeichnet.

Zu erkennen ist eine ähnliche Dominanz von Wohngebäuden mit Altersklassen älter 45 Jahre (Baujahr bis 1978). Zudem ist im oberen Kartenausschnitt im linken Teil der rechten Hälfte der südliche Teil eines Wohngebiets zu erkennen, welches nicht im Zensus Gebäudedatensatz erfasst ist (Ansammlung türkiser Hausumringe). Das gezeigte Wohngebiet befindet sich in meiner direkten Nachbar\*innenschaft und sah bei Begehung mit laienhafter Einschätzung nach einem Neubau-Gebiet aus, vermutlich mit Baujahr nach Erfassung der Zensus-Daten im Jahr 2011. Vorhandene Luft-Wärmepumpen vor einigen Wohnhäusern im vermuteten Neubaugebiet deuten auf ein modernes Heizsystem ohne aktuellem energetischem Sanierungsbedarf hin.



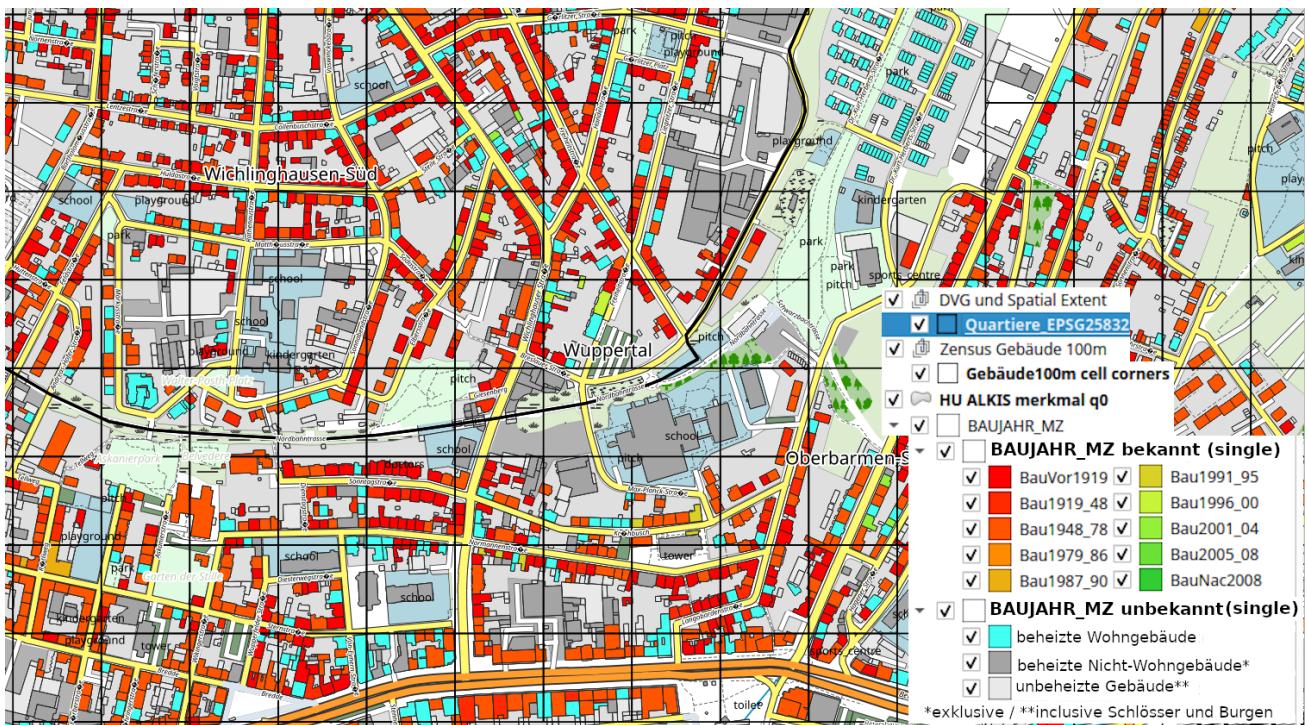
**Abbildung 5.10** Ausschnitt Wuppertals, Hausumringen zugewiesene Altersklassen mit Zensus-Qualitätsschwellenwert null, Großansicht

### Vergleich von Altersklassen-Zuweisungen in QGIS je nach gesetztem Zensus-Qualitätsschwellenwert in einem Beispiel-Kartenausschnitt im Detail

Exemplarisch sei hier noch der Vergleich der modifizierten Hausumringe aus dem ALKIS Datensatz mit zugewiesenen Baualtersklassen für die verwendeten Zensus-Qualitäts-Schwellenwerte null und eins gezeigt. Abbildung 5.12 zeigt einen Kartenausschnitt aus Wuppertal Osterholz, in welcher vermehrt Altersklassen-Daten mit Zensus Qualitäts-Angabe eins vorhanden sind. Hausumringe vom Typ beheizter Wohngebäude mit unbekannter Altersklasse wurden hier lila gekennzeichnet, jene vom Typ beheizter Nicht-Wohngebäude und vom Typ unbeheizter Gebäude (irrelevant) wie in den vorigen Graphiken grau bzw. weiß.

Eingezeichnet sind hierbei noch alle vorhandenen Zensus Gebäude-Gitterzellen im Gebiet. Zusätzlich wurden Gitterzellen mit mehr als 5 Altersklassen-Angaben türkis umrandet und jene mit einer absoluten Differenz größer gleich drei von summierten Altersklassen-Angaben (mit Zensus-Qualität kleiner gleich dem Schwellenwert) zur Gesamt-Gebäudezahl der jeweiligen Gitterzelle wurden mit dunkelblauer Schraffierung gekennzeichnet. Als Basis-Layer wurden wie in Abbildung 5.11 OSM-Layer verwendet.

Hervorzuheben im gezeigten Gebiet ist die hohe Vollständigkeit von Altersklassen-Zuweisungen bei Mitberücksichtigung von Altersklassen-Angaben mit Zensus-Qualitätswert eins. Beim Vergleich der türkis umrandeten Gitterzellen (eher die Ausnahme) fällt die unterschiedlich hohe Altersklassen-Zuweisungs-Rate bei beiden Schwellenwerten auf. Die Plausibilität der genauen Lokalisierung der Altersklassen-Zuweisungen ist fraglich, insbesondere bei benachbarten Hausumringen mit gleichem Grundriss, aber unterschiedlichen Zuweisungen, dennoch ergibt sich ein



**Abbildung 5.11** Ausschnitt Wuppertals, Hausumringen zugewiesene Altersklassen mit Zensus-Qualitätsschwellenwert null, Detailansicht

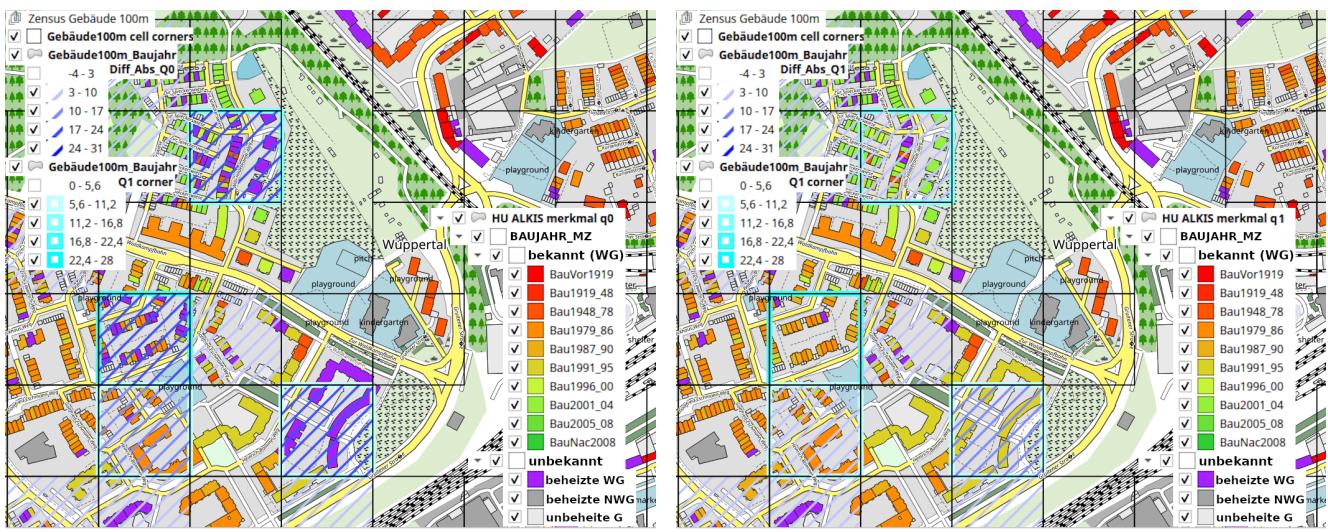
guter Überblick über die vorherrschenden Altersklassen einzelner Wohngebiete.

Ebenfalls zu erkennen ist die Anwendung des Algorithmus zur Teil-Berücksichtigung von Altersklassen-Angaben für Gitterzellen mit mehr Altersklassen-Angaben als zuzuweisenden Hausumringen in der Gitterzelle ganz oben rechts. Im einen Fall gibt es drei dunkel orangene und zwei hell orangene Hausumringe, im anderen Fall zwei dunkel orangene und drei hell orangene Hausumringe. (Ein zufallsgewählter Dreier-Wert wurde auf zwei reduziert.) Die Implementation eines (Pseudo-)Zufalls-Element im Code führt in diesen Fällen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Die zufallsbedingten Unterschiede werden hier als marginal betrachtet, da die Altersklassen-Verteilung im modifizierten Hausumringe Datensatz eine ähnliche bleibt wie jene im originalen Zensus Gebäudedatensatz. Der Hinweis erfolgt lediglich, da mit der verwendeten Methode keine exakte Reproduzierbarkeit der Ergebnisse möglich ist.

## 5.7 Wärmenetz-Ausbaupotential in Wuppertal

Für die Abschätzung des Wärmenetz-Ausbaupotentials in Wuppertal wurde die im Python-Tool entwickelte Methode zur Werte-Aggregation in Sub-Arealen auf Baublöcke Wuppertals angewandt. Die aus den RWB-Modell des LANUV entnommenen Raumwärmebedarfe je Hausumring wurden in Baublöcken aggregiert und der spezifische Wärmebedarf je Flächeneinheit und Jahr für alle Baublöcke bestimmt. Daraufhin wurde eine Einteilung der spezifischen Wärmebedarfe nach Eignung für Wärmenetze gemäß dem Leitfaden der KEA-BW vorgenommen. [43]

Abbildung 5.13 zeigt die Baublöcke (dünn schwarz umrandet) mit Farbfüllung je Eignungs-



a Zensus Qualitätsschwellenwert null

b Zensus Qualitätsschwellenwert eins

**Abbildung 5.12** Ausschnitt Wuppertals, Hausumringen zugewiesene Altersklassen mit Zensus-Qualitätsschwellenwert null bzw. eins, Vergleichsansicht

grad und die Quartiersgrenzen (dick schwarz umrandet) inklusive Beschriftung. Insgesamt zeigt sich in weiten Teilen Wuppertals eine sehr hohe Wärmenetzeignung mit spezifischen Wärmebedarfen von größtenteils 1050 MWh/ha\*a, in der Abbildung grün markiert. Der spezifische Wärmebedarf korreliert dabei stark mit der Einwohner\*innendichte in den jeweiligen Gebieten. Umliegend zeigen sich noch weitere Gebiete, welche einen spezifischen Wärmebedarf zwischen 415 und 1050 MWh/ha\*a entsprechend dem Richtwert konventioneller Wärmenetze besitzen, in der Abbildung türkis markiert. In den tendentiell weiter außen liegenden und weniger dicht besiedelten Stadtteilgebiete ist der spezifische Wärmebedarf deutlich geringer. Für spezifische Wärmebedarfe zwischen 175 und 415 MWh/ha\*a wird gemäß Leitfaden der KEA-BW der Einsatz von Niedertemperatur-Wärmenetzen im Bestand empfohlen, in der Abbildung hellblau markiert. Bei niedrigeren spezifischen Wärmebedarfen ab 70 MWh wird der Einsatz von Wärmenetzen nur in Neubaugebieten empfohlen. Liegt der spezifische Wärmebedarf unter 70 MWh, so liegt in der Regel kein technisches Potential für Wärmenetze vor.

Als nächsten Schritt wurden die spezifischen Wärmebedarfe je Baublock um die Wärmeliniedichten je Straßenzug ergänzt und mit dem Bestands-Wärmenetz der Wuppertaler Stadtwerke (WSW) im gezeigten Gebiet verglichen. Die Daten der Wärmeliniedichten entstammen dem RWB-Modell des LANUV und sind angegeben als Wärmeverbrauch je Straßenmeter und Jahr. Da für das Wärmenetz keine Geodaten verfügbar waren, wurde dessen Abdeckung nachträglich in einem Bildbearbeitungsprogramm hinzugefügt. Hierfür wurde ein Screenshot im *energieatlas.nrw* genommen, das Wärmenetz herausgeschnitten, eingefärbt, in einer zusätzlichen Bild-Ebene eingefügt, zweiteilig skaliert, positioniert und manuell wieder verbunden. Die zweiteilige Skalierung und Positionierung war nötig, da vermutlich ein anderes KBS verwendet wurde im *energieatlas.nrw* und andernfalls verzerrungsbedingt deutlich erkennbare Versätze entstünden.

Abbildung 5.14 zeigt die eingefärbten Baublöcken, die Wärmeliniedichten und das Bestands-Wärmenetz WSW im gezeigten Gebiet. Baublocke ohne technisches Potential für Wärmenetze

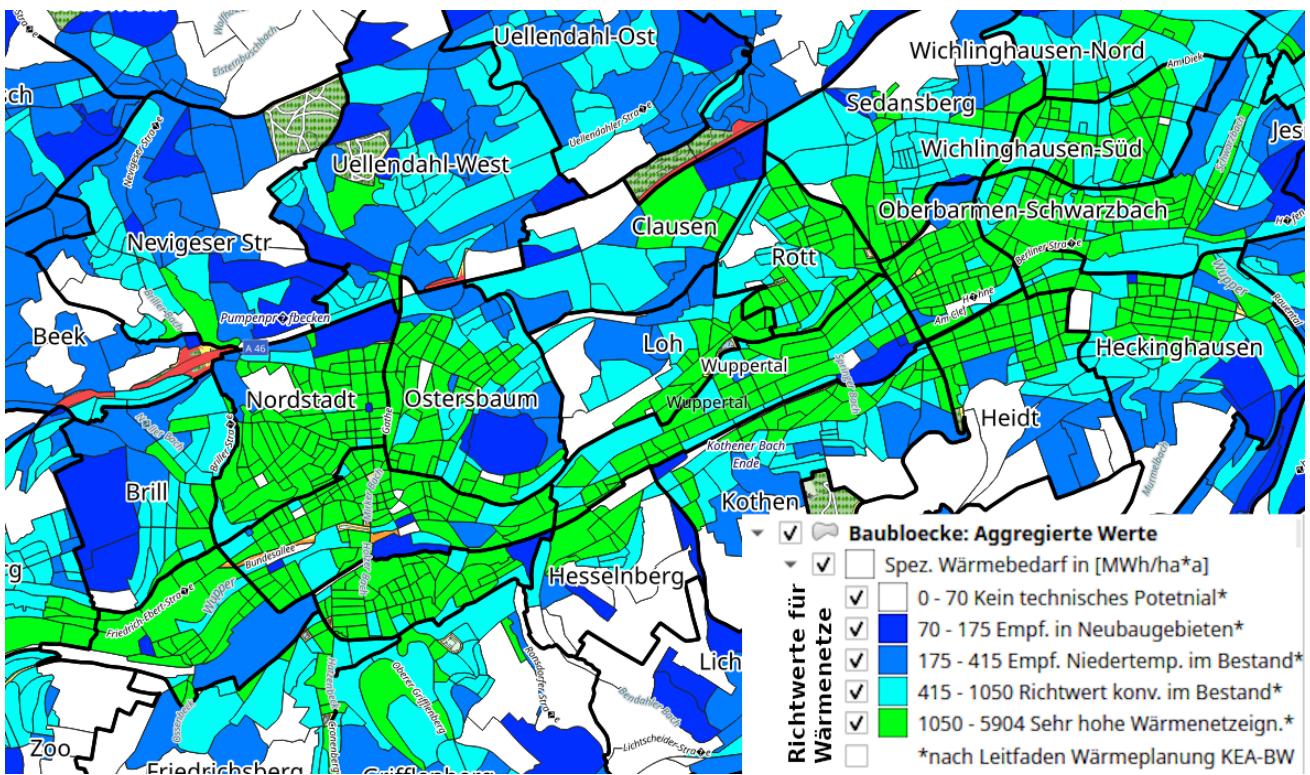


Abbildung 5.13 Spezifischer Wärmebedarf je Baublock mit Wärmenetz-Richtwerten, Wuppertal

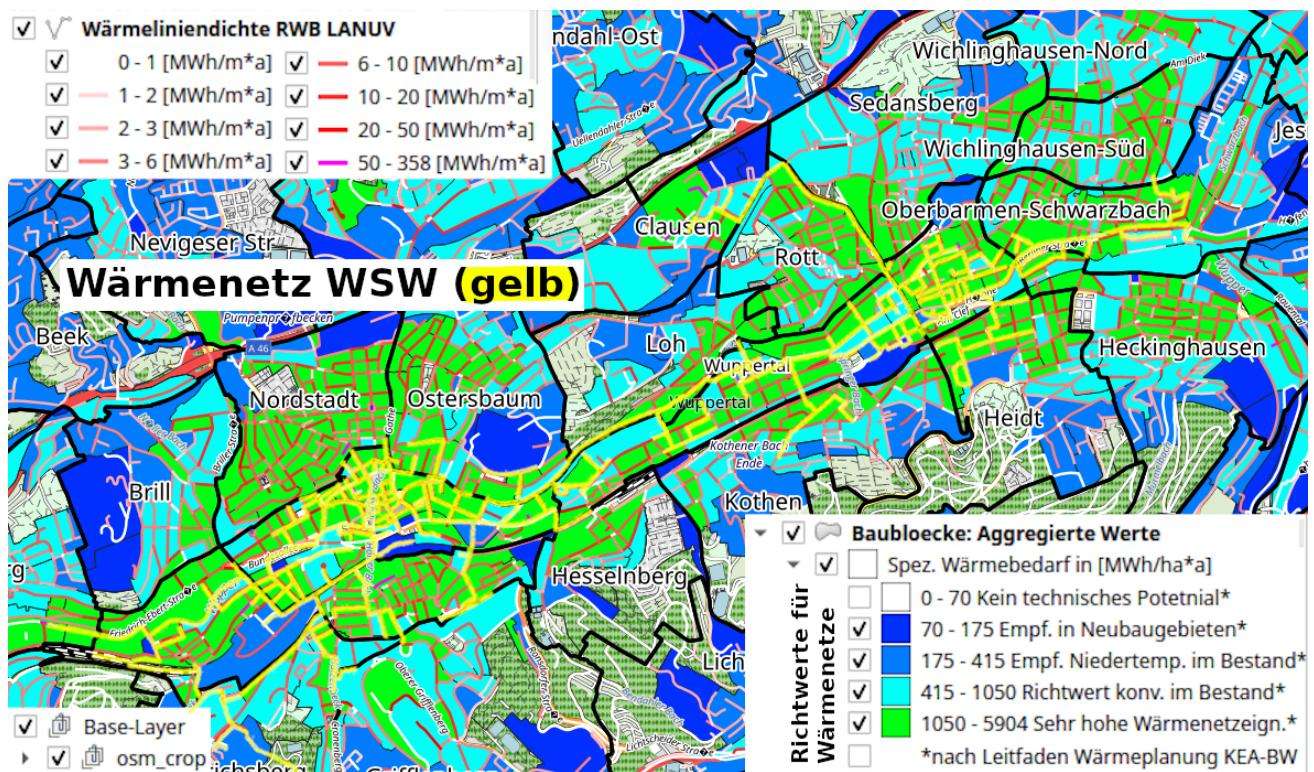
wurden ausgeblendet. Die Staffelung der farblichen Markierung für die Wärmelinien dichten orientiert sich dabei an der Einteilung im *energieatlas.nrw* mit zusätzlicher Staffelung für Wärmelinien dichten größer 6 MWh/m<sup>2</sup>a.

In den Baublöcken mit sehr hoher Wärmenetzeignung (grün) zeigen auch die Wärmelinien dichten in der Regel eine sehr hohe Wärmenetzeignung mit spezifischen Wärmebedarfen von größer 6 MWh/m<sup>2</sup>a. Typische Anschlussdichten in bestehenden Wärmenetzen in der Schweiz und in Dänemark liegen zum Vergleich etwa zwischen 0,5 und 3,5 MWh/m<sup>2</sup>a. [77]

Die WSW plant bereits den Um- und Ausbau des bestehenden Netzes in Elberfeld mit Umstieg von Dampf auf Heißwasser als Medium. Der Umstieg wird für 284 Hausanschlüsse umgesetzt, hinzu kommt ein Potential von weiteren 400 Anschlussmöglichkeiten laut WSW. Für das Projekt sollen bis zum Jahr 2030 insgesamt 24 Kilometer neue Rohrleitungen verlegt und zwei Dampf-/Heizwasser-Umformstationen mit Leistung von je 20 kW installiert werden. [1]

Das Wärmenetz der WSW hatte im Jahr 2020 eine Jahres-Wärmeeinspeisung von insgesamt 679.784 MWh (469.371 MWh Tal, 210.413 MWh Südhöhe), wovon der größte Teil, insgesamt 633.146 MWh (ca. 93,14 %) aus der Müllverbrennungsanlage stammten (KWK 425.132 MWh Tal, KWK 165.863 MWh Südhöhe, Nicht-KWK 43.151 MWh Südhöhe) und der Rest aus KWK- und Heizkessel-Anlagen, welche mit Erdgas und Heizöl betrieben wurden.[1, s. Häufige Fragen, Bescheinigung EE-Anteile]

Zum Vergleich dazu, wird im Excel-Tabelle des LANUV zum Ausbaustand wärmeerzeugender Energieanlagen der jährliche Gesamt-Wärmebedarf für Raumwärme und Warmwasser von Wuppertal mit 4.066 GWh angegeben mit Stand der Daten von 2021. Der Fernwärme-Anteil aus der



**Abbildung 5.14** Spezifischer Wärmebedarf je Baublock mit Wärmenetz-Richtwerten, Wärmeliniendichten und Wärmenetz der WSW, Wuppertal

Müllverbrennungs-Anlage wird hier anders als in der Bescheinigung der WSW mit 532.525 MWh angegeben. Der durch die Müllverbrennungs-Anlage gedeckte Fernwärme-Anteil von Wuppertals Gesamt-Wärmebedarf (für Raumwärme und Warmwasser, ohne Prozesswärme) läge damit ca. zwischen 13,1 % (nach LANUV) und 15,6 % (nach Bescheinigung der WSW).

Der Anteil der durchs Wärmenetz der WSW mit Wärme aus der Müllverbrennungs-Anlage gedeckte Wärmebedarf am Gesamt-Wärmebedarf von Wuppertal (ohne Prozesswärme) lässt sich leider nicht direkt mit dem Anteil der durch Fernwärme versorgten Gebäude oder Wohnung aus den Zensusdaten in Tabelle 5.5 vergleichen, da bei der Auswertung der Zensus-Daten alle Wohnungen und Gebäude im Rechteck um die DVG von Wuppertal, Velbert und Solingen berücksichtigt wurden.

Eine genauere Analyse der Zensus-Daten hinsichtlich Fernwärme-Versorgung von Gebäuden oder Wohnungen in QGIS konnte außer Zeitgründen nicht durchgeführt werden. Anzunehmen wäre, dass das Versorgungsgebiet des Wärmenetzes der WSW in den Zensus-Datensätzen erkennbar wäre. Wobei anzumerken ist, dass die Zensusdaten aus dem Jahr 2011 stammen und Zusammenschlüsse von einzelnen Gebäuden mit gemeinsamer Wärmeerzeugung als Fernwärme gewertet wurden.

---

# 6 Schlussbetrachtungen

## 6.1 Fazit

Im Zuge dieser Arbeit konnte ein Python-Tool zur systematischen Aufbereitung von Daten für Wärmeplanungen entwickelt und exemplarisch auf eine Beispielregion angewandt werden. Sämtliche im Themenblatt erwähnten Teilaufgaben konnten erfüllt werden.

### Analyse: Wärmewende und Sanierungspotential/-entwicklung in Deutschland

Es wurde eine Analyse der Ausgangssituation des Wärmesektors in Deutschland durchgeführt. Die Ergebnisse zum Tempo der Wärmewende und zur noch bestehenden, überwiegend auf fossilen Energieträgern basierenden Wärmeversorgungsstruktur sind ernüchternd, insbesondere im Hinblick auf die Dringlichkeit einer erfolgreichen Energie- und Wärmewende, um die Folgen des Klimawandels ökosozial verträglich zu halten. Um katastrophale Folgen für unser aller Biosphäre und Lebensgrundlage zu vermeiden, muss die Geschwindigkeit beim Ausbau von Erneuerbaren Energien, klimafreundlicher Heizsysteme und Wärmenetze drastisch erhöht und die nicht-pflegenumsetzende Art klimaschädlicher exploitativer Ressourcennutzung drastisch reduziert werden.

Insbesondere Wärmenetze bieten großes Potential eine resiliente Wärme-Versorgungsinfrastruktur zu realisieren mit langfristig ganzheitlich (ökologisch-wirtschaftlich) guter Bilanz. Wichtige Voraussetzung hierfür ist, dass diese nicht auf fossilen Energieträgern basieren und nicht zu Preismissbrauchszielen genutzt werden. Somit zeigen sich neben noch gravierenden Missständen im Status-Quo des Wärmesektors auch realistische positive Handlungsperspektiven auf.

Auch die Analyse der Sanierungsentwicklung und des -potentials in Deutschland konnte durchgeführt werden. Ähnlich zur obig beschriebenen Analyse zeichnet sich beim Auswerten der Ergebnisse ein durchwachsenes Bild ab. Die Mehrheit aller Wohngebäude stammt noch aus der Zeit vor der ersten Wärmeschutzverordnung 1977. Viele Bauten stammen insbesondere aus der direkten Nachkriegszeit mit historisch bedingt nach heutigen Maßstäben tendenziell schlechten Energiekennwerten während des Baus. Insgesamt lässt sich ein hohes Modernisierungspotential abschätzen. Die energetische Modernisierungsrate müsste jedoch für einen zeitnahen klimaneutralen Gebäudebestand in noch realistischem, wenn auch extremen Maß zunehmen mit einer knappen Vervierfachung der Geschwindigkeit.

Da keine Erhöhung der energetischen Modernisierungsrate von Wohngebäuden absehbar ist, müssen dringend politische Maßnahmen ergriffen werden. Mögliche Hebel sind zum Beispiel Förderungen zur Finanzierung, Veränderungen von Eigentumsstrukturen und Einführung obligatorischer Maßnahmen.

### Sichtung, Bewertung und Auswahl von Daten für Wärmeplanungen

Die Ergebnisse der Sichtung von öffentlich verfügbaren Daten und Bewertung derer Eignung für Wärmeplanungen hat gezeigt, dass bereits eine gute Basis einer Vielzahl geeigneter Daten vorliegen. Dies gilt insbesondere für NRW durch zahlreiche bereit gestellte Daten des LANUV und weitere über die Plattform *OpenGeoData.NRW* gesammelte und angebotene Daten.

Ein Manko, welches sich bei Schaffung einer Datengrundlage jedoch gezeigt hat, ist die

nicht flächendeckende und zentrale Verfügbarkeit von Daten zur bestehenden Infrastruktur wie Wärme- oder Gasnetze wie sie bei Netzbetreibenden vorliegen und gebäudescharf aufgelöste Wärme- oder auch Gas- bzw. Ölverbrauchsdaten, wie sie bei Versorgungsunternehmen vorliegen. Insbesondere Daten zu Wärmeverbräuchen von Nicht-Wohngebäuden und zu Prozesswärme-Bedarfen und Abwärme-Potentialen von Gewerbe und Industrie sind nur unzureichend Daten verfügbar. Auch die Analyse der Gebäudealtersstruktur anhand der Daten des Zensus 2011 konnte nicht gebäudescharf vorgenommen werden, da die Daten lediglich in 100 m x 100 m Raster bereit gestellt werden.

Die Schaffung geeigneter rechtlicher Rahmenbedingungen von Seiten der Legislative ist wichtig, um vorhandenen Daten zur Infrastruktur und gebäudescharfer Verbräuche auf eine einheitliche Art und Weise beispielsweise für Wärmeplanende und Forschende zum Zwecke von Wärmeplanungen nutzbar zu machen. Ein gutes Beispiel in diese Richtung bietet das Klimaschutzgesetz Baden-Württembergs, welches Wärmeplanende dazu ermächtigt zum Zwecke von Wärmeplanungen detaillierte Verbrauchsdaten von Versorgungsunternehmen zu erheben.

Mit dem entwickelten Python-Tool konnte trotz dieser Limitierungen eine gute Datengrundlage für Wärmeplanungen geschaffen werden. Das Tool ermöglicht die systematische Datenaufbereitung einer Vielzahl an Datensätzen. Zur Auswahl verwendeter und ausgewerteter Datensätze gehören Amtliche Basiskarten (ABK), OpenStreetMap Karten, Hausumringe des Amtlichen Liegenschaftskataster-Informationssystems (ALKIS), Gebäude- und Wohnungsdaten des Zensus 2011, Raumwärmebedarfsmodelle (RWB-Modelle) des LANUV, Daten zu Standorten von Energieerzeugungs-Anlagen, mit KWK-Relevanz oder Industriellem Abwärmepotential des LANUV und Daten über Schutzgebiete in der Landschaftsinformationssammlung (LINFOS) des LANUV.

### Implementierte Funktionalitäten im entwickelten Python-Tool

Zu den implementierten Funktionalitäten des entwickelten Python-Tools gehören u.a. Prä-Prozessierungs-Routinen für den Zuschnitt der Daten auf eine gewünschte Region, für die Bereinigung von Daten durch Filterung nach Merkmalen (Zensus) bzw. Energieträger oder Aggregationsniveau (Erzeugungs-Anlagen Standorte, LANUV) und für die Reformatierung zur Aufbereitung für QGIS (Zensus) und für die Kennzeichnung von Datenlücken (Zensus). Für drei Datensätze konnte eine vollständig automatisierte Datenaufbereitung implementiert werden, welche zusätzlich, falls nötig, die benötigten Daten herunterlädt und aufbereitet (ABK, RWB-Modelle, LINFOS). In den anderen Fällen müssen die Rohdaten zunächst manuell heruntergeladen werden.

Kritisch anzumerken ist, dass sich für die Aufbereitung der ALKIS-Hausumringe retrospektiv betrachtet eine Gebäude-Typisierung anhand der Gebäudefunktion gleich jener im RWB-Modell des LANUV besser geeignet hätte als die eigene, wenige detaillierte Variante.

Ebenfalls implementiert sind Post-Prozessierungs-Routinen, um Synthese-Datensätze zu erstellen. Dazu gehören modifizierte Hausumring-Daten des ALKIS-Datensatzes, welchen Merkmals-Ausprägungen des Zensus-Gebäudedatensatzes wie Gebäudealtersklassen zugewiesen werden oder Sub-Areale, in welchen Werte wie estimierte Wärmeverbräuche aggregiert werden. Daraus abgeleitet werden dann spezifische Wärmeverbräuche je Fläche und Jahr als Indikator für die Eignung von Wärmenetzen. Sub-Areale können Gitterzellen oder andere relativ feingliedrige, regionale Einteilungen wie Baublöcke oder Quartiere einer Gemeinde sein.

Das Tool verfügt darüber hinaus über mehrere Pre-Analyse-Routinen, welche die automatische Generierung mehrerer Statistiken ermöglicht. Implementiert sind diese für Datensätze wie die Gebäude- und Wohnungsdaten des Zensus, den Hausumringen des ALKIS-Datensatzes und des erstellten Hausumring-Synthese-Datensatzes. Ermittelt werden Häufigkeitsverteilungen von Ausprägungen gewählter Zensus-Merkmale wie der Baualtersklasse, dem Heiztyp oder der Wohnungs-Eigentums- bzw. -Bewohnungsstruktur in der untersuchten Region oder von Gebäudetypen gemäß der im ALKIS definierten Gebäudemerkmalen.

### **Exemplarische Anwendung des Python-Tools**

Exemplarisch wurde das Tool auf eine Beispielregion um Wuppertal, Velbert und Solingen herum angewandt. Es konnte die Korrektheit der ausgeführten Funktionalitäten belegt, die Daten auf Vollständigkeit hin überprüft, die gewonnenen Ergebnisse präsentiert und ausgewertet werden.

Die untersuchte Region weist mit über 80 % der Wohngebäude älter 45 Jahre einen überdurchschnittlich alten Wohngebäudebestand vor, was als Indikator für ein hohes energetisches Modernisierungspotential gewertet wird. Im Vergleich dazu verzeichnet die durchschnittliche Wohngebäude-Altersklassen-Verteilung in Deutschland einen Anteil von ca. 64 % an Wohngebäuden älter 45 Jahre. Allerdings ist das Verhältnis vom Anteil bewohnter Mietwohnungen zu Eigentumswohnungen mit ca. 57 zu 35 % höher als im bundesdeutschen Durchschnitt von ca. 51 zu 47 %, wodurch das realistische Modernisierungspotential etwas geringer ausfallen dürfte als aufgrund der Altersstruktur zu vermuten wäre.

Für QGIS konnten auf die untersuchte Region zugeschnittene Basis-Layer mithilfe von ABK und OSM-Daten zuzüglich Layer-Style-Definitionen erstellt werden. Hausumringe wurden anhand zugewiesener Altersklassen und/oder anhand vorliegender Gebäudetypen eingefärbt visualisiert und verglichen. Es konnten Standorte für Energie-Erzeugungsanlagen mit Symbolisierung nach Anlagentyp gezeigt werden. Auch die Visualisierung estimerter, spezifischer Wärmeverbräuche für Sub-Areale konnte exemplarisch für Baublöcke Wuppertals demonstriert werden. Mit Vergleich zum Bestands-Wärmenetz der Wuppertaler Stadtwerke konnte gezeigt werden, dass gerade in den Ballungsräumen erhebliches Ausbaupotential für das Wärmenetz mit überdurchschnittlich hohen möglichen Anschlussdichten besteht.

Das entwickelte Python-Tool ist durch die Integration vieler Datensätze, den modularen Aufbau und die zahlreichen implementierten Funktionalitäten ein wertvolles Werkzeug für Wärmeplanungen und Forschung. Es kann in vollem Umfang für alle Regionen in NRW und in begrenztem Umfang in ganz Deutschland angewandt werden.

## **6.2 Ausblick**

»Die Gegenwart sollte an die Zukunft keine Fragen stellen, sondern Forderungen!«

[Erich Mühsam, *Alle Macht den Räten*, 1930]

Da Forschende neben mit ihrer Forschungsarbeit gleichfalls politische Akteur\*innen sind und mit ihrer Arbeit an der politischen Willensbildung mitwirken, werden in diesem Ausblick frei nach dem Zitat Mühsams explizit Forderungen gestellt ebenso wie konventionellerweise Handlungsempfehlungen gegeben.

## Handlungsempfehlungen und Forderungen an die Zukunft

Um die Wärmewende weiter voran zu treiben sind legislative Maßnahmen wie die verpflichtende Erstellung von Wärmeplanungen für Kommunen ab einer gewissen Größe und Förderungen für deren Umsetzung sowie Mindestanforderungen an deren Zielsetzungen wichtige Schritte in die richtige Richtung, was Beispiele wie Dänemark zeigen. Ebenso wichtig ist allerdings auch die Umsetzung von Wärmeplänen und der im Zuge dieser entwickelten Strategien. Daher sollte auch die Umsetzung für Kommunen rechtlich bindend sein.

Alle verfügbaren Daten, die zum Zwecke gemeinwohlorientierter Wärmeplanungen benötigt werden, sind Wärmeplanenden und Forschenden in diesem Bereich zugänglich zu machen. Die Befugnis zur Nutzung dieser Daten muss rechtlich gewährleistet werden. Dazu gehören u.a. Daten zur Infrastruktur von Versorgungsnetz-Betreibenden (Gas, Wärme, Wasser, Internet), zum Verbrauch von Versorgungsunternehmen (Gas, Öl, Wärme) und zur genauen Gebäudealtersstruktur von Katasterämtern.

Wärmenetze als Systemdienstleistende in integrierten zukunftsfähigen Energiesystemen müssen klimatisch, ökologisch und sozial gemeinwohlorientiert geplant, installiert und betrieben werden. Ausnutzung natürlicher Monopolstellungen zu Preismissbrauch und langfristig planmäßiger Betrieb auf Basis fossiler Brennstoffe ist auszuschließen.

Forschung zum Erschließungspotential Erneuerbarer Energiequellen muss weiter gefördert und ausgebaut werden. Es müssen detaillierte Daten zu Potentialen von Abwärme (z.B. aus Industrieprozessen, Serverfarmen, Fertigungsanlagen und Abwasser), Umweltwärme (z.B. Seen, Flüsse und Grubenwasser), Photovoltaik/Solarthermie (auf Frei- und Dachflächen), Geothermie (oberflächennah, mitteltief und tief) und Biomasse (z.B. nachwachsender Reststoffe und Energiepflanzen, organischer Abfälle, Klärgas und Biogas) gesammelt und Werkzeuge zu deren Ermittlung entwickelt werden, damit Wärmeplanungen durchgeführt werden können. Gute Beispiele hierfür bieten die Potentialstudien des LANUV.

## Begründung der genannten Forderungen

Die genannten Forderungen sind nach persönlicher Einschätzung und Bewertung der Ausgangssituation des Wärmesektors, des gegenwärtigen Stadiums des Klimawandels und der aktuellen politischen Situation mit geplanter Einführung obligatorischer Wärmeplanungen angemessen und deren Umsetzung notwendig. Die Forderungen begründen sich zum Einen in der Dringlichkeit der Energiewende, um massive ökosoziale Folgeschäden eines ungebremsten Klimawandels zu verhindern sowie der essentiellen Bedeutung von Wärmeplanung für die Wärmewende. Zum Anderen gebietet das Grundgesetz durch Art. 2 Abs. 2 Satz 1 die ausdrückliche Stellung dieser Forderungen und durch Art. 2 Abs. 2 Satz 1, Art. 14 Abs. 2 und Art. 20a die Gewährleistung der Umsetzung aller geforderten Maßnahmen durch Exekutive, Legislative und Judikative.

## Weiterentwicklung des erstellten Python-Tools und dieser Arbeit

Im Folgenden sind einige Ideen und Vorschläge zur Weiterentwicklung des entwickelten Python-Tools genannt.

Die Software-Architektur sollte grundlegend umstrukturiert werden zur besseren Integration weiterer Datensätze und Funktionalitäten. Anbieten würde sich ein Main-Script, in welchem für alle ausgewählten zu verwendenden Datensätze je eigene Skripte aufgerufen werden. Alle

definierten Funktionen und Klassen sollten in eigenen datensatz-spezifische Libraries statt in einer singulären Library definiert werden, gleiches gilt für datensatz-unspezifische Funktionen. Dieser Aufbau würde insbesondere beim weiteren Ausbau des Software-Tools sowohl die Übersichtlichkeit verbessern, als auch den Grad der Modularität erhöhen. Je nach verwendeten Datensätzen ließen sich so nur Teile des entwickelten Tools laden.

Für das Tool sollte zusätzlich eine default-Ordnerstruktur für alle hinterlegten bzw. zu hinterlegenden Daten definiert werden, um die Definition von Dateipfaden zu vereinfachen und die Daten übersichtlicher zu sammeln.

Für die einfachere Bedienbarkeit des Tools für Menschen sollte ein interaktiver Modus als default-Modus integriert werden, in welcher alle Optionen und verwendeten Dateipfade von User\*innen erfragt und als Einstellungen abgespeichert werden. Dies könnte die Nutzung des Tools für weniger programmier-affine Menschen erleichtern.

Für eine Out-of-the-Box-Nutzung des Tools könnte eine vollständige Automatisierung der Datenaufbereitung aller im Tool verwendeten Datensätze durch automatischen Download anhand hinterlegter URLs implementiert werden.

Für eine Anwendung der Pre-Analyse-Routinen, sollten diese optimal für Teilbereiche durchgeführt werden können. Beispielsweise durch temporären Zuschnitt der bereits präprozessierten Daten z.B. auf ein Stadtgebiet, um die dortigen Altersklassenverteilungen und ähnliches besser analysieren zu können.

Zur besseren Verwendbarkeit des Tools in anderen Bundesländern als NRW bietet sich die Integration der bundesweit verfügbaren Daten des Marktstammregisters (MaStR) zu Energie-Erzeugungs-Anlagen an. Empfehlenswert wäre hierbei eine Aufbereitung ähnlich zur gegebenen Struktur des Energie-Erzeugungs-Anlagen Datensatzes des LANUV.

Als hilfreiche alternative Basis-Layer für QGIS bietet sich potentiell die Aufbereitung verfügbarer Satellitenfotos an.

Auch die Integration der 3D-Gebäudemodelle LoD1 und/oder LoD2 des BKG könnte erprobt werden. Für Kommunen ohne Zugang zu genauen Verbrauchsdaten oder estimerter Verbrauchsdaten wie jenen im RWB-Modell des LANUV können diese zur Erstellung eines eigenen RWB-Modell nach Vorbild des LANUV auf Basis von ALKIS-Hausumringen und LoD genutzt werden. Die Modelle können eventuell durch Abschätzung von Altersklassen anhand der Gebäudedaten des Zensus 2011 oder zukünftig des Zensus 2022 verfeinert und gegebenenfalls zur Optimierung des Modells mit verfügbaren realen Verbrauchsdaten abgeglichen werden.

Die Post-Prozessierungs-Routine zur Aggregation von Werten für Sub-Areale könnte ausgebaut werden durch Integration von Erzeugungs-Daten anhand der Daten des LANUV oder des MaStR. Zudem bietet sich die Implementation von INSPIRE-konformen Gitterzellen als default Sub-Areale an. Die Anwendung der Routine wurde exemplarisch für Baublöcke Wuppertals demonstriert, lässt sich aber durch minimale Anpassung für jegliche Polygone anwenden.

Darüber hinaus sollten weitere Daten gesichtet werden. Beispiele hierfür können beispielsweise die Daten Geologischer Dienste sein, welche in dieser Arbeit kaum untersucht wurden. Dazu gehören beispielsweise auch Daten, welche wie Web-Dienst zum Einbinden in GIS via url angeboten werden. Zum automatisierten Import solcher Daten in QGIS könnte separates Tools entwickelt werden, gegebenenfalls mit zusätzlicher Aufbereitung innerhalb von QGIS.



---

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Entwicklung der jährlichen Treibhausgas-Emissionen in Deutschland[25] . . . . .	4
2.2	Entwicklung des spezifischen Wärmebedarfs von Gebäuden: Regulatorische Mindestanforderungen, Baupraxis und Forschung [5] . . . . .	5
2.3	Wärmeverbrauchs-Anteil am Endenergieverbrauch, aufgeteilt in Raum- und Prozesswärme . . . . .	9
2.4	Entwicklung des Anteils Erneuerbarer Energien im Wärmesektor in Deutschland . .	10
2.5	Wärmeerzeuger im Fernwärmennetz Vojens [14, S.40] . . . . .	13
2.6	Beteiligten-Spektrum einer lokalen Wärmewende [54, S. 19] . . . . .	19
2.7	Energieatlas NRW - Wärmekataster: Eigene Darstellungen, Legende editiert [26] . .	25
3.1	Beispiel Ausschnitt Amtlicher Basiskarte (farbig und schwarz-weiß) [8] . . . . .	31
3.2	Beispiel OSM Darstellung in unterschiedlichen QML Styles . . . . .	32
4.1	Programm-Ablaufsplan mit In- und Output-Files je Datensatz inklusive Dateiformat	47
4.2	Stdout Präprozessierungs-Routine für den Erzeugungs-Anlagen NRW Datensatz des LANUV . . . . .	57
5.1	Baselayer Cropping OSM und ABK auf gewählte DVG (türkis) (EPSG:3035) . . . .	62
5.2	Baselayer Vergleich OSM und ABK im Detail (orig. 1:2500) . . . . .	63
5.3	Vergleich der Hausumringe-Geometrie [ALKIS, LANUV, OSM], Großansicht . . . .	64
5.4	Liste und Form autogenerierter merkmalsspezifischer Zensus Pre-Analyse .csv-Dateien	67
5.5	Zensus Gebäude- und Wohnungsdaten, Abdeckung und Dichte in Teilgebiet Wuppertals	71
5.6	Zensus Gebäudedaten: Qualität der Altersklassen-Angaben in Teilgebiet Wuppertals	72
5.7	Zensus Einwohnungsdaten: Einwohner*innen je Gitterzelle in Teilgebiet Wuppertals	73
5.8	Zensus Einwohnungs- und Wohnungsdaten: Dichte-Vergleich in Teilgebiet Wuppertals	74
5.9	Standorte für Energie-Erzeugung Strom, Wärme und für industrielle Abwärme und KWK-relevante Standorte im zugeschnittenen Gebiet . . . . .	76
5.10	Ausschnitt Wuppertals, Hausumringen zugewiesene Altersklassen mit Zensus-Qualitätsschwellenwert null, Großansicht . . . . .	80
5.11	Ausschnitt Wuppertals, Hausumringen zugewiesene Altersklassen mit Zensus-Qualitätsschwellenwert null, Detailansicht . . . . .	81
5.12	Ausschnitt Wuppertals, Hausumringen zugewiesene Altersklassen mit Zensus-Qualitätsschwellenwert null bzw. eins, Vergleichsansicht . . . . .	82
5.13	Spezifischer Wärmebedarf je Baublock mit Wärmenetz-Richtwerten, Wuppertal . .	83
5.14	Spezifischer Wärmebedarf je Baublock mit Wärmenetz-Richtwerten, Wärmeliniedichten und Wärmenetz der WSW, Wuppertal . . . . .	84
A.1	Fernwärmennetz Vojen, Netzausbau (lila), Stand 2006 [65] . . . . .	102
A.2	Ausgabe des Docstrings der Klasse <i>zensusdata</i> . . . . .	103
A.3	Ausgabe des Docstrings der Methode <i>remap_zensusdata()</i> der Klasse <i>zensusdata</i> .	104
A.4	Vergleich der Hausumringe-Geometrie in den Datensätzen (ALKIS, LANUV, OSM), Detailansicht . . . . .	106

---

# Tabellenverzeichnis

2.1	Wohngebäude in Hessen mit Wärmedämmung bei Bau bzw. nachträglich durch energetische Modernisierungs-Maßnahmen [19, S. 108], eigene Darstellung . . . . .	6
2.2	Bauteilmodernisierungsraten im Vergleich [48, S. 41] . . . . .	7
2.3	Relative Anteile der Energieträger im Fernwärmennetz Vojen nach Betreiber*innen Deklarationen 2020, 2021 und 2022 [64] . . . . .	13
3.1	Anwendungsfälle und Datenquellen im Überblick . . . . .	29
3.2	Liste von Merkmalen und Ausprägungen im Zensus 2011 Datensatz zu Wohnungen und Gebäude im 100m Gitterraster . . . . .	36
3.3	Darstellung der Daten einer Gitterzellen aus dem Zensus-Datensatz für Gebäude und Wohnungen. Spalten für Zeilen-ID und Gitter_ID_100m_neu sowie Zeilen bestimmter Merkmale entfernt. (Blaugrün mit Blau ohne Grün: Gebäudedatensatz, Blaugrün mit Grün ohne Blau: Wohnungsdatensatz) Geänderte Spaltenbezeichnungen: Ausprägung_Code: Code, Ausprägung_Text: Text, Anzahl_q: q . . . . .	37
5.1	Hausumringe ALKIS: Lese-, Schreibzeiten, Anzahl, In- und Output-Dateigrößen und -formate . . . . .	64
5.2	Hausumring-Anzahl der häufigsten GFK je GFK-Typ, einzeln und summiert . . . .	65
5.3	Zensus: Lese-, Remapping- und Schreibzeiten, In- und Output-Dateigrößen und -formate	66
5.4	Baualtersklassen-Verteilung für Wohnungen und Gebäude im Wahlgebiet im Vergleich	67
5.5	Heiztyp-Häufigkeiten für Wohnungen und Gebäude im Wahlgebiet im Vergleich . .	69
5.6	Heiztyp-Häufigkeiten für Wohnungen und Gebäude im Wahlgebiet im Vergleich . .	69
5.7	RWB LANUV: Download, Lese, Kombinier-, Zuschnitts- und Schreibzeiten, In- und Output-Dateien . . . . .	74
5.8	EE-NRW: Lese-, Georeferenzierungs- und Schreibzeiten, In- und Output-Dateien .	74
5.9	HU-Merkmales-Zuweisung: Lese-, Bearbeitungs- und Schreibzeiten, In- und Output Dateigrößen und -formate . . . . .	77
5.10	Anzahl der Hausumringe mit zugewiesener Altersklasse für GFK mit zensus-flag = 1	78
5.11	Häufigkeit von Altersklassen und Heiztypen im Zensus Gebäudesatz und bei zugewiesenen Hausumringen . . . . .	78
A.1	Gebäudematrix mit Gebäudetypologisierung aus den Daten des Zensus 2011 ohne Gebäudetypen Hochhaus(HH) und Sonderfälle(F/F, NBL_x) Erläuterung der Kürzel: EFH Einfamilienhaus, RH Reihenhaus, MFH = Mehrfamilienhaus, GMH großes Mehrfamilienhaus [45, S. 18] . . . . .	101
A.2	Liste aller ALKIS (und ATKIS) GFK-Codes und -Texten inkl. selbst gesetzter Flags [23][80] . . . . .	105

---

# Akronyme

**CLK** Clock *siehe SCL & SCK*

**SCK** Serial Clock *siehe SCL & CLK*

**SCL** Serial Clock Line *siehe SCK & CLK*

# Literatur

- [1] 2030, Projektwebseite: WSW Talwärme Elberfeld. *Bauprojekt Elberfeld 2030 – Nachhaltige Zukunft für Wuppertal*. Wuppertaler Stadtwerke (WSW). 2023. URL: <https://www.wsw-online.de/talwaerme-elberfeld2030/> (besucht am 27.04.2023).
- [2] *3D-Gebäudemodelle der Landesvermessung NRW*. Bezirksregierung Köln. URL: [https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk\\_internet/geobasis/3d\\_gebaudemodelle/index.html](https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/3d_gebaudemodelle/index.html) (besucht am 24.04.2023).
- [3] *Abbildung: Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Wärme 1990 bis 2020 (vorläufige Angabe)*. Umweltbundesamt (UBA), Sep. 2022. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/6\\_abb\\_anteil-ee-eev\\_2022-12-19.png](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/6_abb_anteil-ee-eev_2022-12-19.png) (besucht am 28.02.2023).
- [4] *Abbildung: Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2019 nach Strom, Wärme und Verkehr*. Agentur für Erneuerbare Energien e.V., AEE, 2020. URL: [https://www.unendlich-viel-energie.de/media/image/54221.AEE\\_Endenergieverbrauch\\_Strom\\_Waerme\\_Kraftstoffe\\_2019.jpg](https://www.unendlich-viel-energie.de/media/image/54221.AEE_Endenergieverbrauch_Strom_Waerme_Kraftstoffe_2019.jpg) (besucht am 28.02.2023).
- [5] *Abbildung: Entwicklung Energiesparendes Bauen*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP. URL: <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/kompetenzen/energieeffizienz-und-raumklima/energiesparendes-bauen.html>.
- [6] *Abbildung: Erneuerbare Energien: Anteile in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr*. Umweltbundesamt (UBA), 2021. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/bilder/dateien/ee\\_anteile\\_in\\_den\\_sektoren\\_strom\\_waerme\\_und\\_verkehr.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/bilder/dateien/ee_anteile_in_den_sektoren_strom_waerme_und_verkehr.pdf) (besucht am 28.02.2023).
- [7] *Abbildung: Wärmeverbrauch nach Energieträger - Entwicklung von 2008 bis 2020*. Umweltbundesamt (UBA), Feb. 2021. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/3\\_abb\\_waermeverbrauch-nach-et\\_2022-12-19.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/3_abb_waermeverbrauch-nach-et_2022-12-19.pdf) (besucht am 28.02.2023).
- [8] *Amtliche Basiskarte*. Bezirksregierung Köln. URL: [https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk\\_internet/geobasis/liegenschaftskataster/aktuell/alkis-folgeprodukte/amtliche\\_basiskarte/index.html](https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/liegenschaftskataster/aktuell/alkis-folgeprodukte/amtliche_basiskarte/index.html) (besucht am 17.03.2023).
- [9] *Artikel: Nachkriegsbauten der 50er Jahre*. Baunetz\_Wissen\_. URL: <https://www.baunetzwissen.de/altbau/fachwissen/baualtersstufen/nachkriegsbauten-der-50er-jahre-148204> (besucht am 09.04.2023).

- [10] Baier, Simon. *Blog-Eintrag: Why you should use GeoPackage instead of Shapefile*. GIS-Blog. 13. März 2018. URL: <https://www.gis-blog.com/geopackage-vs-shapefile/> (besucht am 17.03.2023).
- [11] Bracke, Prof. Dr. Rolf; Rocholl, Prof. Dr. Walter; Schmidt, Prof. Dr. Benno; Bussmann, Dipl.-Geophys. Gregor; Timm Eicker, M.Sc. und Kelz, Dipl.-Ing. (FH) Bettina. *Potentialstudie Erneuerbare Energien NRW. Teil 4 - Geothermie*, LANUV-Fachbericht 40. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), 2015. URL: [https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3\\_fachberichte/Fachbericht\\_40-Teil4-Geothermie\\_web.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/Fachbericht_40-Teil4-Geothermie_web.pdf) (besucht am 24.04.2024).
- [12] Breidenbach, Prof. Dr. Stephan; Bußmann-Welsch, Til Martin; Fischer, Luka; Grotenrath, Arne; Heinen, Anna; heyl, Benedikt; Kroher, Salome; Möller, Lena C.; Nesselhauf, Lea und Schmülling, Hauke. *1,5-Grad-Gesetzespaket. Maßnahmenkatalog mit Gesetzesentwürfen*. GermanZero, Feb. 2022. URL: [https://germanzero.de/gz-media/pages/assets/bba00f072f-1675869117/1.5-grad-gesetzespaket\\_germanzero\\_02\\_2022.pdf](https://germanzero.de/gz-media/pages/assets/bba00f072f-1675869117/1.5-grad-gesetzespaket_germanzero_02_2022.pdf) (besucht am 14.03.2023).
- [13] Brockjan, Katharina; Maier, Lucia; Kott, Kristina und Sewald, Nadin. *Datenreport 2021. Kapitel: Umwelt, Energie und Mobilität*. Auszug. Statistische Bundesamt (Destatis), 2021.
- [14] Brügging, Dr.-Ing. Elmar und Willenbrink, Dipl. Geogr. Hinnerk. *Kommunale Wärmeleitplanung. Potentiale und Möglichkeiten*. Kommunalfachtagung 2022. Präsentationsfolien. FH Münster University of Applied Sciences, Sep. 2022.
- [15] *Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)*. Bundesministerium der Justiz, Bundesamt für Justiz. 18. Aug. 2021. URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf> (besucht am 13.03.2023).
- [16] Bürger, Dr. Veit (Projektleitung); Hesse, Dr. Tilman; Palzer, Dr. Andreas; Köhler, Benjamin; Herkel, Sebastian und Engelmann, Dr. Peter. *Klimaneutraler Gebäudebestand 2050. Energieeffizienzpotentiale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand*. Studie. Öko-Institut, Freiburg; Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg, Nov. 2017. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-11-06\\_climate-change\\_26-2017\\_klimaneutraler-gebaeudebestand-ii.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-11-06_climate-change_26-2017_klimaneutraler-gebaeudebestand-ii.pdf) (besucht am 28.02.2023).
- [17] Cepicky, Jachym. *Switch from Shapefile*. 8. Okt. 2017. URL: <http://switchfromshapefile.org/> (besucht am 17.03.2023).
- [18] champs-libres. *Gitlab-Repository: champs-libres-qgis-osm-style. Map style for QGIS*. 2022. URL: <https://gitlab.com/champs-libres/public/champs-libres-qgis-osm-style/-/tree/master/> (besucht am 26.03.2023).
- [19] Cischinsky, Dr. Holger und Diefenbach, Dr. Nikolaus. *Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand*. Studie. Darmstadt: IWU, Institut Wohnen und Umwelt, 17. Apr. 2018. URL: [https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/2018\\_IWU\\_CischinskyEtDiefenbach\\_Datenerhebung-Wohngeb%C3%A4udebestand-2016.pdf](https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/2018_IWU_CischinskyEtDiefenbach_Datenerhebung-Wohngeb%C3%A4udebestand-2016.pdf) (besucht am 28.02.2023).

- [20] *Das neue Gebäudeenergiegesetz (GEG) im Überblick*. Greenhouse Media GmbH. 29. Aug. 2022. URL: <https://www.energie-experten.org/energie-sparen/energieberatung/gebaeudeenergiegesetz> (besucht am 14.03.2023).
- [21] *Die dänische Wärmewende*. Projekt Kommunale Wärmeplanung. 1. Aug. 2021. URL: <https://www.waermewende.de/daenischewaermewende/> (besucht am 15.03.2023).
- [22] *Dokumentation. Geographische Gitter für Deutschland GeoGitter*. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. URL: [https://sg.geodatenzentrum.de/web\\_public/gdz/dokumentation/deu/geogitter.pdf](https://sg.geodatenzentrum.de/web_public/gdz/dokumentation/deu/geogitter.pdf) (besucht am 02.05.2023).
- [23] *Download: ALKIS Gebäude- und Bauwerkfunktion Codierungs-Dictionary*. Geodateninfrastruktur Deutschland (GDI-DE). 24. Nov. 2021. URL: <https://repository.gdi-de.org/schemas/adv/citygml/Codelisten/BuildingFunctionTypeAdv.xml> (besucht am 17.03.2023).
- [24] Dunkelberg, Elisa; Weiß, Julika und Hirschl, Bernd. *Wärmewende in Städten Gestalten. Empfehlungen für eine sozial-ökologische Transformation der Wärmeversorgung am Beispiel von Berlin*. Policy Paper. Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Mai 2020.
- [25] *Emissionsquellen. Treibhausgas-Emissionen in Deutschland seit 1990 nach Kategorien der UNFCCC-Berichterstattung*. Umweltbundesamt. 5. Juli 2021. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen/emissionsquellen#energie-stationar> (besucht am 28.02.2023).
- [26] *Energieatlas NRW*. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV). 2020. URL: <https://www.energieatlas.nrw.de/> (besucht am 17.03.2023).
- [27] *Energieverbrauch für fossile und erneuerbare Wärme*. 19. Dez. 2022. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-fuer-fossile-erneuerbare-waerme> (besucht am 28.02.2023).
- [28] Engelmann, Peter; Köhler, Benjamin; Meyer, Robert; Dengler, Jörg; Herkel, Sebastian; Kießling, Lea; Quast, Anneke; Berneiser, Jessica; Bär, Christian; Sterchele, Philip; Heilig, Judith; Bürger, Veit; Köhler, Benjamin; Braungardt, Sibylle; Hesse, Tilman; Sandrock, Matthias; Maaß, Christian und Strodel, Nikolai. *Systemische Herausforderung der Wärmewende*. Abschlussbericht. Umweltbundesamt (UBA), 2021. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-04-26\\_cc\\_18-2021\\_waermewende.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-04-26_cc_18-2021_waermewende.pdf) (besucht am 15.03.2023).
- [29] *EPSG Geodetic Parameter Dataset*. Geomatic Solutions. 2023. URL: <https://epsg.org/home.html> (besucht am 16.03.2023).
- [30] *ESRI Shapefile Technical Description. An ESRI White Paper*. Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI), Juli 1998. URL: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/sitecore-archive/Files/Pdfs/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf> (besucht am 17.03.2023).
- [31] *Firmen-Webseite mit Geschichte und Standort(en)*. Stannol GmbH und Co. KG. URL: <https://www.stannol.de/unternehmen/geschichte.html> (besucht am 25.04.2023).

- [32] *Gemeindeverzeichnis: Alle politisch selbständigen Gemeinden mit ausgewählten Merkmalen am 31.12.2022 (4. Quartal)*. Statistische Bundesamt (Destatis). 12. Jan. 2023. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Administrativ/Archiv/GVAuszugQ/AuszugGV4QAktuell.html>.
- [33] *Geothermie in NRW - Standortcheck (Web-Anwendung)*. Geologischer Dienst NRW. URL: <https://www.geothermie.nrw.de/> (besucht am 26.04.2023).
- [34] *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz, GEG)*. Version novelliert am 20.07.2022. Bundesministerium der Justiz, Bundesamt für Justiz. 8. Aug. 2020. URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/> (besucht am 14.03.2023).
- [35] *Glossar-Eintrag: Amtlicher Gemeindeschlüssel (AGS)*. Statistische Bundesamt (Destatis). URL: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Glossar/amtlicher-gemeindeschlussel.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Glossar/amtlicher-gemeindeschluessel.html) (besucht am 17.03.2023).
- [36] *Glossar-Eintrag: Regionalschlüssel (RS)*. Statistische Bundesamt (Destatis). URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Glossar/regionalschluessel.html> (besucht am 17.03.2023).
- [37] *GV-ISys (Gemeindeverzeichnis-Informationssystem). Verzeichnis der Regional- und Gebietseinheiten Definitionen und Beschreibungen*. Statistische Bundesamt (Destatis). 2021. URL: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Administrativ/beschreibung-gebiets-einheiten.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Administrativ/beschreibung-gebiets-einheiten.pdf?__blob=publicationFile) (besucht am 17.03.2023).
- [38] Kienzlen, Dr. Volker; Böhnisch, Helmut; Bieber, Harald; Bürger, Veit; Nast, Michael; Pehnt, Dr. Martin; Schmidt, Maike; Leprich, Prof. Dr. Uwe und Schulz, Wolfgang. *Bedeutung von Wärmenetzen für die Energiewende*. Positionspapier. Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH (KEA-BW), 2014. URL: [https://www.kea-bw.de/fileadmin/user\\_upload/Publikationen/Positionspapier\\_zu\\_Nahwaerme.pdf](https://www.kea-bw.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Positionspapier_zu_Nahwaerme.pdf) (besucht am 14.03.2023).
- [39] *Klima in NRW. Aktuelle Themen und Projekte*. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV). URL: <https://www.lanuv.nrw.de/klima> (besucht am 24.04.2023).
- [40] *Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz Baden-Württemberg (KlimaG BW)*. Landesrecht Baden-Württemberg. jurs GmbH im Auftrag des Innenministeriums Baden-Württemberg. 7. Feb. 2023. URL: <https://www.landesrecht-bw.de/jportal/portal/tm6i/page/bsbauueprod.psml> (besucht am 15.03.2023).
- [41] *Klimaschutzgesetz. Generationenvertrag für das Klima*. Deutsche Bundesregierung. 2021. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672> (besucht am 13.03.2023).
- [42] Knopf, Brigitte und Geden, Oliver. *Ist Deutschland auf dem 1,5-Grad-Pfad? Eine Einordnung der Diskussion über ein nationales CO2-Budget*. Stellungnahme. Mercator Research Institute on Global Commons und Climate Change (MCC) GmbH, März 2022.

- [43] *Kommunale Wärmeplanung*. Handlungsleitfaden. Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH (KEA-BW), Dez. 2021. URL: [https://www.kea-bw.de/fileadmin/user\\_upload/Publikationen/094\\_Leitfaden-Kommunale-Waermeplanung-022021.pdf](https://www.kea-bw.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/094_Leitfaden-Kommunale-Waermeplanung-022021.pdf) (besucht am 14.03.2023).
- [44] *Leitfaden Kommunale Wärmeplanung: Arbeitshilfe 1. Bestandsaufnahme: Daten und Datenquellen*. Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen, März 2022. URL: [https://www.klimaschutz-niedersachsen.de/\\_downloads/FaktenpapiereLeitfaeden/LeifadeKommWaermeplanung/01\\_2019-12-17\\_Leitfaden-Waermeplanung\\_Arbeitshilfe1.pdf](https://www.klimaschutz-niedersachsen.de/_downloads/FaktenpapiereLeitfaeden/LeifadeKommWaermeplanung/01_2019-12-17_Leitfaden-Waermeplanung_Arbeitshilfe1.pdf) (besucht am 02.05.2023).
- [45] Loga, Tobias; Stein, Britta; Diefenbach, Nikolaus und Born, Rolf. *Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*. Darmstadt: IWU, Institut Wohnen und Umwelt, 10. Feb. 2015. URL: [https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/episcope/2015\\_IWU\\_LogaEtAl\\_Deutsche-Wohngeb%C3%A4udetypologie.pdf](https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/episcope/2015_IWU_LogaEtAl_Deutsche-Wohngeb%C3%A4udetypologie.pdf) (besucht am 28.02.2023).
- [47] Lücking, Heiz-Josef. *Wiki-Eintrag: Geographic information system*. GISWiki. 12. Jan. 2008. URL: [http://www.giswiki.org/wiki/Geographic\\_information\\_system](http://www.giswiki.org/wiki/Geographic_information_system) (besucht am 15.03.2013).
- [48] Metzger, Sebastian; Jahnke, Katy; Walikewitz, Nadine; Oto, Markus; Grondey, Andreas und Fritz, Sara. *Wohnen und Sanieren. Empirische Wohngebäudedaten seit 2002*. Hintergrundbericht. Umweltbundesamt und co2online gemeinnützige GmbH, 2019.
- [49] Müller, Ariane. *Das Gebäudeenergiegesetz (GEG) 2022 und Novelle 2023*. DAA GmbH. 23. Jan. 2023. URL: <https://www.heizungsfinder.de/heizung/gebaeudeenergiegesetz> (besucht am 14.03.2023).
- [50] *Offene Daten Wuppertal. Baublöcke Wuppertal*. Stadt Wuppertal. URL: <https://www.offenedaten-wuppertal.de/dataset/baubl%C3%BCcke-wuppertal> (besucht am 24.04.2023).
- [51] *OpenStreetMap-Wiki. Artikel: Map features*. 2023. URL: [https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map\\_features](https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map_features) (besucht am 02.05.2023).
- [52] *Pressemitteilung: Deutschlandwetter im Jahr 2022. Deutschland erlebt eines der zwei wärmsten Jahre und einen Sonnenscheinrekord*. Deutscher Wetter Dienst. 30. Dez. 2022. URL: [https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2022/20221230\\_deutschlandwetter\\_jahr2022\\_news.html](https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2022/20221230_deutschlandwetter_jahr2022_news.html) (besucht am 28.02.2023).
- [53] *QGIS Desktop User Guide/Manual (QGIS 3.22)*. QGIS project. 14. März 2023. URL: [https://docs.qgis.org/3.22/en/docs/user\\_manual/](https://docs.qgis.org/3.22/en/docs/user_manual/) (besucht am 16.03.2023).
- [54] Riechel, Robert und Koritkowski, Sven. *Wärmewende im Quartier. Hemmnisse bei der Umsetzung am Beispiel energetischer Quartierskonzepte*. Deutsche Institut für Urbanistik (difu), Aug. 2016. URL: <https://backend.repository.difu.de/server/api/core/bitstreams/a7c961a4-a577-4540-bf18-6fae89029234/content> (besucht am 15.03.2023).

- [55] Riechel, Robert und Walter, Jan. *Kurzgutachten Kommunale Wärmeplanung*. Umweltbundesamt, Dez. 2022. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte\\_12-2022\\_kurzgutachten\\_kommunale\\_waermeplanung.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_12-2022_kurzgutachten_kommunale_waermeplanung.pdf) (besucht am 15.03.2023).
- [56] Strohschein, Jan; Erdmenger, Christoph; Albert, Reinhard; Bade, Michael; Behnke, Anja; Böhme, Simone; Hannig, Andreas; Hülsmann, Wulf; Johnke, Bernt; Kaschenz, Helmut; Lohse, Christiane; Miehe, Anne; Pichl, Peter; Saupe, Stephan; Schubert, Anja; Wachsmann, Ulrike; Werner, Kathrin und Westermann, Bärbel. *Nachhaltige Wärmeversorgung*. Sachstandsbericht. Umweltbundesamt (UBA), 2007.
- [57] Thiele, Lasse; Krohn, Ruth und Schmelzer, Matthias. *Mit grüner Marktwirtschaft das Klima retten? Klimagerechtigkeits-Check der Ampel-Regierung*. Stellungnahme. Konzeptwerk Neue Ökonomie. URL: [https://konzeptwerk-neue-oekonomie.org/wp-content/uploads/2022/01/Konzeptwerk\\_Klimagerechtigkeits-Check\\_der\\_Ampel-Regierung\\_2022.pdf](https://konzeptwerk-neue-oekonomie.org/wp-content/uploads/2022/01/Konzeptwerk_Klimagerechtigkeits-Check_der_Ampel-Regierung_2022.pdf) (besucht am 14.03.2023).
- [58] *Treibhausgas-Emissionen in Deutschland*. Umweltbundesamt. 15. März 2022. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland> (besucht am 28.02.2023).
- [59] *Übersicht zur Entwicklung der energiebedingten Emissionen und Brennstoffeinsätze in Deutschland 1990 - 2020. unter Verwendung von Berechnungsergebnissen der Nationalen Koordinierungsstelle Emissionsberichterstattung*. CLIMATE CHANGE 20/2022. Umweltbundesamt (UBA), 2022.
- [60] *Umweltökonomische Gesamtrechnung. Methode: Rechnung zum Energieverbrauch der Haushalte für Wohnen*. Statistische Bundesamt (Destatis). 2020. URL: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/private-haushalte/Publikationen/Downloads/rechnung-energieverbrauch-5851318209004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/private-haushalte/Publikationen/Downloads/rechnung-energieverbrauch-5851318209004.pdf?__blob=publicationFile) (besucht am 13.03.2023).
- [61] *Umweltökonomische Gesamtrechnung. Private Haushalte und Umwelt*. Statistische Bundesamt (Destatis), 2022. URL: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/private-haushalte/Publikationen/Downloads/haushalte-umwelt-pdf-5851319.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/private-haushalte/Publikationen/Downloads/haushalte-umwelt-pdf-5851319.pdf?__blob=publicationFile) (besucht am 13.03.2023).
- [62] *Umweltökonomische Gesamtrechnung. Anthropogene Luftemissionen*. Statistische Bundesamt (Destatis), 2022.
- [63] *Verwaltungsverfahrens Beschluss GEM. P32b GWB. innogy SE als Rechtsnachfolgerin der RWE Energiedienstleistungen GmbH*. Bundeskartellamt. 13. Feb. 2017. URL: [https://www.bundeskartellamt.de/SharedDocs/Entscheidung/DE/Entscheidungen/Missbrauchsaufsicht/2017/B8-30-13.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bundeskartellamt.de/SharedDocs/Entscheidung/DE/Entscheidungen/Missbrauchsaufsicht/2017/B8-30-13.pdf?__blob=publicationFile&v=2) (besucht am 25.04.2023).
- [64] *Vojens Fernwärme, Webpräsenz: Fjernvarmedeklaration (dt. Deklaration Fernwärme)*. Vojens Fjernvarme. URL: <https://www.vojensfjernvarme.dk/profil/fjernvarmedeklaration/> (besucht am 14.03.2023).

- [65] *Vojens Fernwärme, Webpräsenz: Forsyningsområde (dt. Versorgungsgebiet)*. Vojens Fjernvarme. URL: <https://www.vojensfjernvarme.dk/media/21199/vojensby.pdf> (besucht am 14.03.2023).
- [66] *Vojens Fernwärme, Webpräsenz: Historie*. Vojens Fjernvarme. URL: <https://www.vojensfjernvarme.dk/profil/historie/> (besucht am 14.03.2023).
- [67] *Vojens Fernwärme, Webpräsenz: Kedler og motorer (dt. Kessel und Motoren)*. Vojens Fjernvarme. URL: <https://www.vojensfjernvarme.dk/profil/kedler-og-motorer/> (besucht am 14.03.2023).
- [68] *Vojens Fernwärme, Webpräsenz: Om os (dt. Über uns)*. Vojens Fjernvarme. URL: <https://www.vojensfjernvarme.dk/profil/om-os/> (besucht am 14.03.2023).
- [69] *Web-Anwendung: Informationssystem oberflächennahe Geothermie Baden-Württemberg (ISONG)*. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB). URL: <https://isong.lgrb-bw.de/> (besucht am 02.05.2023).
- [70] *Webpräsenz der AdV. Eintrag zum Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS)*. Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV). 2023. URL: <https://www.adv-online.de/AdV-Produkte/Liegenschaftskataster/ALKIS/> (besucht am 02.05.2023).
- [71] *Webpräsenz Geofabrik*. Geofabrik GmbH Karlsruhe. URL: <https://www.geofabrik.de/> (besucht am 17.03.2023).
- [72] *Webpräsenz: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. INSPIRE Daten und Dienste*. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG). URL: <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/inspire.html> (besucht am 02.05.2023).
- [73] *Webpräsenz: INSPIRE Knowledge Base. Infrastructure for spatial information in Europe*. Europäische Komission. URL: <https://inspire.ec.europa.eu/about-inspire/563> (besucht am 02.05.2023).
- [74] *Webpräsenz: Marktstammdatenregister (MaStR)*. Bundesnetzagentur. URL: <https://www.marktstammdatenregister.de/> (besucht am 27.03.2023).
- [75] *Webpräsenz: OpenGeodata.NRW. produkte (Downloads)*. Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (IT.NRW). URL: <https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/> (besucht am 17.03.2023).
- [76] *Webpräsenz: OpenStreetMap - Deutschland*. FOSSGIS e.V. URL: <https://openstreetmap.de/>.
- [77] *Webpräsenz: Projekt Wärme in der Euregio - fokussieren und modernisieren (Wiefm)*. Fachhochschule Münster. URL: <https://www.wiefm.eu/> (besucht am 02.05.2023).
- [78] *Webpräsenz: QGIS. A Free and Open Source Geographic Information System*. QGIS project. URL: 2023-03-16 (besucht am 16.03.2023).
- [79] *Webpräsenz: Staatliche Geologische Dienste Deutschlands. Erdwärme / Geothermie*. URL: [https://www.bgr.bund.de/Infogeo/DE/Home/Erdwaerme/erdwaerme\\_node.html](https://www.bgr.bund.de/Infogeo/DE/Home/Erdwaerme/erdwaerme_node.html) (besucht am 02.05.2023).

- 
- [80] Werle, Matthias. *Github-Repository: Wärmeplanung-Datenaufbereitung. Python Tool zur systematischen Aufbereitung von Daten für Wärmeplanungen (Deutschland, NRW)*. 2023. URL: [https://github.com/Humanimaliberation/Waermeplanung\\_Datenaufbereitung](https://github.com/Humanimaliberation/Waermeplanung_Datenaufbereitung) (besucht am 23.03.2023).
  - [81] *Wie viel CO<sub>2</sub> darf Deutschland maximal noch ausscheiden? Fragen und Antworten zum CO<sub>2</sub>-Budget.* Stellungnahme. Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), Juni 2022. URL: [https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04\\_Stellungnahmen/2020\\_2024/2022\\_06\\_fragen\\_und\\_antworten\\_zum\\_co2\\_budget.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=13](https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2020_2024/2022_06_fragen_und_antworten_zum_co2_budget.pdf?__blob=publicationFile&v=13) (besucht am 01.03.2023).
  - [82] Wiegand, Daniel; Sargl, Manfred; Doerenbruch, Kerstin; Wittmann, Günter und Wofsteiner, Andreas. *Berechnung Paris-kompatibler Emissionspfade mit dem ESP-Modell am Beispiel der EU*. Studie. Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft (ZBW), Nov. 2022. DOI: DOI10.5281/zenodo.7376561.
  - [83] *Wiki-Eintrag: Geoinformationssystem.* deutsche Wikipedia. 3. März 2023. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Geoinformationssystem> (besucht am 15.03.2023).
  - [84] *Wiki-Eintrag: Lambert azimuthal equal-area projection.* Englische Wikipedia. 10. Jan. 2023. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lambert\\_azimuthal\\_equal-area\\_projection](https://en.wikipedia.org/wiki/Lambert_azimuthal_equal-area_projection) (besucht am 16.03.2023).
  - [85] *Wiki-Eintrag: Lambert conformal conic projection.* Englische Wikipedia. 12. Jan. 2023. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lambert\\_conformal\\_conic\\_projection](https://en.wikipedia.org/wiki/Lambert_conformal_conic_projection) (besucht am 16.03.2023).
  - [86] *Wiki-Eintrag: Spatial reference system.* Englische Wikipedia. 8. Jan. 2023. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Spatial\\_reference\\_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Spatial_reference_system) (besucht am 16.03.2023).
  - [87] *Wissensportal. Best Practice Wärmenetze.* Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg (KEA-BW). URL: <https://www.kea-bw.de/waermewende/wissensportal/best-practice> (besucht am 13.03.2023).
  - [88] Wuppertal Institut. *CO<sub>2</sub>-neutral bis 2035. Eckpunkte eines deutschen Beitrags zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze.* Bericht. Wuppertal, Okt. 2020. URL: [https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7606/file/7606\\_CO2-neutral\\_2035.pdf](https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7606/file/7606_CO2-neutral_2035.pdf) (besucht am 28.02.2023).
  - [89] *Zensus 2011: Vielfältiges Deutschland. Endgültige Ergebnisse.* Version 2., korrigierte Auflage. Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2016.
  - [90] *Zensus 2011: Zensusatlas (Web-Anwendung).* Statistische Ämter des Bundes und der Länder (destatis). 2020. URL: <https://atlas.zensus2011.de/> (besucht am 26.04.2024).

## Weiterführende Literatur

- [46] Lohmann, Simon. *Thesisvorlage der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik.* Nov. 2021.

# A Anhang

**Tab. 4: Wohnflächen und Häufigkeiten im deutschen Wohngebäudebestand / Basis-Typen / Baujahr bis 2009, Stand: Mai 2011 [Diefenbach 2013]**

Auswertung der Gebäude- und Wohnungszählung 2011 Stichtag: 9.5.2011		Baualtersklassen										Summe	Anteil
		bis 1860	1861 - 1918	1919 - 1948	1949 - 1957	1958 - 1968	1969 - 1978	1979 - 1983	1984 - 1994	1995 - 2001	2002 - 2009		
<b>Deutscher Wohngebäudebestand Baujahre bis 2009</b>	<b>EFH</b>	EFH_A	EFH_B	EFH_C	EFH_D	EFH_E	EFH_F	EFH_G	EFH_H	EFH_I	EFH_J		
	Anzahl Wohngebäude in Tsd.	330	966	1.131	859	1.509	1.507	704	1.160	1.035	775	<b>9.976</b>	55%
	Anzahl Wohnungen in Tsd.	399	1.213	1.389	1.060	1.948	1.915	881	1.397	1.204	858	<b>12.263</b>	31%
	Wohnfläche in Mio. m <sup>2</sup>	46	135	150	116	218	233	110	178	158	119	<b>1.463</b>	41%
	<b>RH</b>	RH_A	RH_B	RH_C	RH_D	RH_E	RH_F	RH_G	RH_H	RH_I	RH_J		
	Anzahl Wohngebäude in Tsd.	148	492	710	447	633	611	335	652	619	384	<b>5.030</b>	28%
	Anzahl Wohnungen in Tsd.	181	617	840	546	749	685	374	722	674	409	<b>5.796</b>	15%
	Wohnfläche in Mio. m <sup>2</sup>	19	62	82	52	76	79	45	85	80	52	<b>633</b>	18%
	<b>MFH</b>	MFH_A	MFH_B	MFH_C	MFH_D	MFH_E	MFH_F	MFH_G	MFH_H	MFH_I	MFH_J		
	Anzahl Wohngebäude in Tsd.	54	442	388	356	586	412	146	309	244	85	<b>3.023</b>	17%
	Anzahl Wohnungen in Tsd.	214	2.177	1.911	2.003	3.348	2.313	852	1.826	1.390	461	<b>16.495</b>	42%
	Wohnfläche in Mio. m <sup>2</sup>	16	163	129	125	225	169	64	133	104	39	<b>1.168</b>	33%
	<b>GMH</b>	GMH_A	GMH_B	GMH_C	GMH_D	GMH_E	GMH_F	GMH_G	GMH_H				
	Anzahl Wohngebäude in Tsd.	0,6	28,7	7,4	17,3	34,0	50,1	15,0	28,7	20,9	7,6	<b>210</b>	1%
	Anzahl Wohnungen in Tsd.	11	526	126	308	818	1.366	356	605	408	151	<b>4.674</b>	12%
	Wohnfläche in Mio. m <sup>2</sup>	0,7	35,8	7,9	17,0	47,1	86,7	21,9	34,8	25,5	10,4	<b>288</b>	8%
<b>Anzahl Wohngebäude in Tsd.</b>		<b>533</b>	<b>1.929</b>	<b>2.236</b>	<b>1.679</b>	<b>2.762</b>	<b>2.580</b>	<b>1.200</b>	<b>2.150</b>	<b>1.919</b>	<b>1.251</b>		<b>18.239</b>
Anteil		3%	11%	12%	9%	15%	14%	7%	12%	11%	7%		
<b>Anzahl Wohnungen in Tsd.</b>		<b>806</b>	<b>4.533</b>	<b>4.265</b>	<b>3.915</b>	<b>6.863</b>	<b>6.279</b>	<b>2.463</b>	<b>4.550</b>	<b>3.675</b>	<b>1.880</b>		<b>39.228</b>
Anteil		2%	12%	11%	10%	17%	16%	6%	12%	9%	5%		
<b>Wohnfläche in Mio. m<sup>2</sup></b>		<b>82</b>	<b>396</b>	<b>370</b>	<b>309</b>	<b>567</b>	<b>569</b>	<b>240</b>	<b>431</b>	<b>368</b>	<b>220</b>		<b>3.552</b>
Anteil		2%	11%	10%	9%	16%	16%	7%	12%	10%	6%		

Gewählte Zuordnung: EFH: freistehende Ein-/Zweifamilienhäuser; RH: Ein-/Zweifamilienhäuser als Doppelhaushälfte, Reihenhaus oder sonstiger Gebäudetyp  
MFH: Mehrfamilienhäuser mit 3-12 Wohnungen, GMH: Mehrfamilienhäuser ab 13 Wohnungen  
Die Angaben beziehen sich ausschließlich auf Wohngebäude (ohne Wohnheime, ohne "sonstige Gebäude mit Wohnraum", ohne "bewohnte Unterkünfte")

IWU

**Tabelle A.1** Gebäudematrix mit Gebäudetypologisierung aus den Daten des Zensus 2011 ohne Gebäudetypen Hochhaus(HH) und Sonderfälle(F/F, NBL\_x) Erläuterung der Kürzel: EFH Einfamilienhaus, RH Reihenhaus, MFH = Mehrfamilienhaus, GMH großes Mehrfamilienhaus [45, S. 18]

Quelle



**Codeversion vom 18.04.2023, Ausgabe gekürzt**

```
>>> help(zensusdata)
Help on class zensusdata in module function_list:

class zensusdata(builtins.object)
| zensusdata(fp=None, celllist=None, m_filter=None, df_orig=None, df=None, gdf=None, col_dict=None, col_ref=None, m_dict=None)
|
| A class to store and preprocess grid-based zensusdata for (Q)GIS
| ...
| Attributes ←
| -----
| fp : str
|   filepath to csv file with grid-based zensus data
| celllist: list
|   list of strings with cell-names for filtering
| col_ref: list
|   list of strings as [identifier, key1, key2, value, quality]
| m_dict : dict
|   dictionary for possible Merkmal and Ausprägung values
|   and new keynames for remapping into new format of df
|   Merkmal-name as keys with each field as list of tuples
|   like {key1:[(str, str, str), ...], key2:[(str, str, str), ...], ...}
|   tuples contain (ausprägung_code, ausprägung_text, new_zensus_key)
|   except last 4 tuples which are reserved for q- and diff-columns
|   {key1:[..., ('', 'q1', <q1-columnname>), ('', 'q2', <q2-columnname>),
|   ('', 'Diff_abs', <DiffAbs-columnname>), ('', 'Diff_rel', <DiffRel-columnname>)], ...}
| m_filter : list
|   list of Merkmal names for filtering, must include 'INSGESAMT'
| df_orig : pandas dataframe
|   dataframe with zensus data in original format
| df : pandas dataframe
|   dataframe with zensus data reformatted (remapped)
| gdf : geopandas geodataframe
|   geodataframe with zensus data (remapped) and grid-geometry
|
| Methods ←
| -----
| read_zensusdata_from_csv()
|   reads zensus data from csv file and stores it in .df_orig
|   optionally filters for .celllist and .m_filter
| remap_zensusdata()
|   remaps zensus data from .df_orig to .df according to m_dict
| add_diff_columns()
|   adds diff columns to .df : INSGESAMT - sum(Merkmal) abs|rel
| add_geometry_column()
|   adds geometry column to .df : geometry as WKT-strings
| get_gdf_from_df()
|   creates geodataframe from .df (with geometry column)
| print_total_number_orig_df()
|   prints some statistics about .df_orig
| print_total_q_diff_number_for_merkmal()
|   prints some statistics about .df for specific Merkmal
|
| Methods internal:
| -----
| _create_empty_dataframe_with_new_columns()
|   creates empty df for remapping .df_orig to
| _get_col_dict()
|   returns dict with new column names for remapping
| _convert_cellname_to_wkt_str(cellname)
|   converts cellname to WKT string with polygon geometry
| _get_colname_for_remapped_df(merkmal, ausprägung)
|   returns new column name for remapped df from self.m_dict
| Example: ←
| -----
|   instantiate class object with filepath to csv file
|   >>> geb100m = zensusdata(fp=path_to_csv_file)
|
|   define celllist and m_filter (has to include 'INSGESAMT') for
|   >>> geb100m.celllist = [cell1, cell2, ...]           filtering
|   >>> geb100m.m_filter = ['INSGESAMT', 'BAUJAHR_MZ', 'HEIZTYP']
|
|   read originally formatted zensus data and access head of it
|   >>> geb100m.read_zensusdata_from_csv()
|   >>> geb100m.df_orig.head()
|
|   remap .df_orig to .df and access head of it
|   note: new column names according to default self.m_dict
|   >>> geb100m.df = geb100m.remap_zensusdata()
|   >>> geb100m.df.head()
|
|   add diff columns and geometry as wkt strings to .df
|   >>> geb100m.add_diff_columns()
|   >>> geb100m.add_geometry_column()
|
|   convert pandas dataframe to geopandas geodataframe
|   >>> geb100m.gdf = geb100m.get_gdf_from_df()
|
|   print out some statistics
|   >>> geb100m.print_total_number_orig_df()
|   >>> geb100m.print_total_q_diff_number_for_merkmal('BAUJAHR_MZ')
|   >>> geb100m.print_total_q_diff_number_for_merkmal('HEIZTYP')
```

Abbildung A.2 Ausgabe des Docstrings der Klasse zensusdata

```

>>> help(zensusdata.remap_zensusdata)
Help on function remap_zensusdata in module function_list:

remap_zensusdata(self, q_threshold=0)
    remaps pandas self.df.orig into a new column format to store in self.df
    remapping is done according to self.m_dict, self.m_filter and q_threshold

Parameters
-----
q_threshold : int, optional
    allowed maximum quality value for values to be used in new df
    accepted values are 0, 1, 2 (0 is best, 2 is worst quality)

    Parameters used from self
    -----
m_dict : dict
    dictionary for possible Merkmal and Ausprägung values
    and new keynames for remapping into new format of df
    Merkmal-name as keys with each field as list of tuples
    like {key1:[(str, str, str), ...], key2:[(str, str, str), ...], ...}
    tuples contain (ausprägung_code, ausprägung_text, new_zensus_key)
    except last 4 tuples which are reserved for q- and diff-columns
    {key1:[..., ('', 'q1', <q1-columnname>), ('', 'q2', <q2-columnname>),
    ('', 'Diff_abs', <DiffAbs-columnname>), ('', 'Diff_rel', <DiffRel-columnname>)], ...} if multiple key1 key2 combination in self.m_dict share t
    m_filter : list
        contains a list of Merkmal names to filter
    df_orig : pandas dataframe
        contains zensus data in original data format
    col_ref : list
        contains a list of strings [identifier, key1, key2, valuename, qualityname]

Returns
-----
df : pandas dataframe
    Note: Datatypes are strings instead of int or float, probably stupid idea, dunno
    thought it would be easier to handle missing values this way, not needed yet

```

Detailed Description

-----

original df has multiple row entries for each cell, cell names are in the column with the key identifier, merkmale are in the column with the key key1 and ausprägungen are in the column with the key key2

e.g. (shortened) (key 2 chosen for text instead of code)

-----

self.df.orig:	key1	key2	value	quality
identifier	'INSGESAMT'	''	20	0
cell1	'BAUJAHR_MZ'	'Vor 1919'	5	0
cell1	'BAUJAHR_MZ'	'1919 - 1948'	10	1
cell1	'BAUJAHR_MZ'	'1949 - 1978'	4	2
cell1	'HEIZTYP'	''	...	...
...	...	...	...	...
cell2	'INSGESAMT'	''	30	0

this df will be remapped into a new df with one row entry for each key1 key2 combination defined in self.m\_dict will be (if key1 value is in self.m\_filter) values will be remapped if quality is below q-threshold

-----

new column name their values will be summed up (if below q-threshold)

extra columns will be added to sum up values for each key1 quality is either 1 (q1-column) or 2 (q2-column)

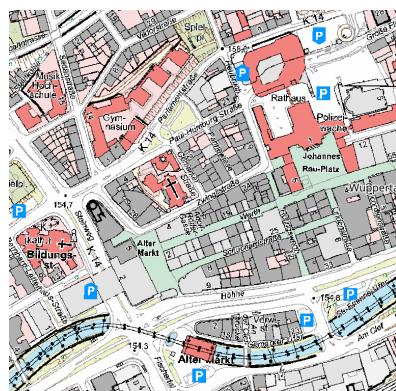
-----

e.g. (if m\_filter contains 'BAUJAHR\_MZ' and q2-threshold new dataframe:

identifier	INSGESAMT	BauVor1919	Bau1919-48	Bau1919-49
cell1	20	5	10	0
cell2	30	...	...	...

-----

gfk_code	gfk_text	zensus	alt_rel	gfk_code	gfk_text	zensus	alt_rel	gfk_code	gfk_text	zensus	alt_rel
31001_1000	Wohngebäude	1	1	31001_2463	Garage	0	0	31001_3094	Gebäude zum U-Bahnhof	0	1
31001_1010	Wohnhaus	1	1	31001_2464	Fahrzeughalle	0	0	31001_3095	Gebäude zum S-Bahnhof	0	1
31001_1020	Wohnheim	1	1	31001_2500	Gebäude zur Versorgung	0	0	31001_3097	Gebäude zum Busbahnhof	0	1
31001_1021	Kinderheim	1	1	31001_2501	Gebäude zur Energieversorgung	0	0	31001_3098	Empfangsgebäude Schifffahrt	0	1
31001_1022	Seniorenhheim	1	1	31001_2510	Gebäude zur Wasserversorgung	0	0	31001_3100	Gebäude für öffentliche Zwecke mit Wohnen	0	1
31001_1023	Schwesterwohnheim	1	1	31001_2511	Wasserwerk	0	0	31001_3200	Gebäude für Erholungszwecke	0	1
31001_1024	Studenten-, Schülerwohnheim	1	1	31001_2512	Pumpstation	0	0	31001_3210	Gebäude für Sportzwecke	0	1
31001_1025	Schullandheim	0	1	31001_2513	Wasserbehälter	0	0	31001_3211	Sport-, Turnhalle	0	0
31001_1100	Gemischt genutztes Gebäude mit Wohnen	1	1	31001_2520	Gebäude zur Elektrizitätsversorgung	0	0	31001_3212	Gebäude zum Sportplatz	0	0
31001_1110	Wohngebäude mit Gemeinbedarf	1	1	31001_2521	Elektrizitätswerk	0	0	31001_3220	Badegebäude	0	1
31001_1120	Wohngebäude mit Handel und Dienstleistungen	1	1	31001_2522	Umspannwerk	0	0	31001_3221	Hallenbad	0	1
31001_1121	Wohn- und Verwaltungsgebäude	1	1	31001_2523	Umformer	0	0	31001_3222	Gebäude im Freibad	0	1
31001_1122	Wohn- und Bürogebäude	1	1	31001_2527	Reaktorgebäude	0	0	31001_3230	Gebäude im Stadion	0	1
31001_1123	Wohn- und Geschäftsgebäude	1	1	31001_2528	Turbinenhaus	0	0	31001_3240	Gebäude für Kurbetrieb	0	1
31001_1130	Wohngebäude mit Gewerbe und Industrie	1	1	31001_2529	Kesselhaus	0	0	31001_3241	Badegebäude für medizinische Zwecke	0	1
31001_1131	Wohn- und Betriebsgebäude	1	1	31001_2540	Gebäude für Fernmeldewesen	0	0	31001_3242	Sanatorium	0	1
31001_1210	Land- und forstwirtschaftliches Wohngebäude	1	1	31001_2560	Gebäude an unterirdischen Leitungen	0	0	31001_3260	Gebäude im Zoo	0	1
31001_1220	Land- und forstwirtschaftliches Wohn- und Betriebsgebäude	1	1	31001_2570	Gebäude zur Gasversorgung	0	0	31001_3261	Empfangsgebäude des Zoos	0	1
31001_1221	Bauernhaus	1	1	31001_2571	Gaswerk	0	0	31001_3262	Aquarium, Terrarium, Völiere	0	0
31001_1222	Wohn- und Wirtschaftsgebäude	1	1	31001_2580	Heizwerk	0	0	31001_3263	Tierschauhaus	0	0
31001_1223	Forschhaus	1	1	31001_2590	Gebäude zur Versorgungsanlage	0	0	31001_3264	Stall im Zoo	0	0
31001_1310	Gebäude zur Freizeitgestaltung	0	1	31001_2591	Pumpwerk (nicht für Wasserversorgung)	0	0	31001_3270	Gebäude im botanischen Garten	0	1
31001_1311	Ferienhaus	0	0	31001_2600	Gebäude zur Entsorgung	0	0	31001_3271	Empfangsgebäude des botanischen Gartens	0	1
31001_1312	Wochenendhaus	0	0	31001_2610	Gebäude zur Abwasserbereitung	0	0	31001_3272	Gewächshaus (Botanik)	0	0
31001_1313	Gartenhaus	0	0	31001_2611	Gebäude der Kläranlage	0	0	31001_3273	Pflanzenschauhaus	0	0
31001_2000	Gebäude für Wirtschaft oder Gewerbe	0	1	31001_2612	Toilette	0	0	31001_3280	Gebäude für andere Erholungseinrichtung	0	1
31001_2010	Gebäude für Handel und Dienstleistungen	0	1	31001_2620	Gebäude zur Abfallbehandlung	0	0	31001_3281	Schutzhütte	0	0
31001_2020	Bürogebäude	0	1	31001_2621	Müllbunker	0	0	31001_3290	Touristisches Informationszentrum	0	1
31001_2030	Kreditinstitut	0	1	31001_2622	Gebäude zur Mühlverbrennung	0	0	31001_9998	Nach Quellenlage nicht zu spezifizieren	0	0
31001_2040	Versicherung	0	1	31001_2623	Gebäude der Alfraldeponie	0	0	51001_1001	Wasserturm	0	0
31001_2050	Geschäftsgebäude	0	1	31001_2700	Gebäude für Land- und Forstwirtschaft	0	0	51001_1002	Kirchturm	0	0
31001_2051	Kaufhaus	0	1	31001_2720	Land- und forstwirtschaftliches Betriebsgebäude	0	0	51001_1003	Aussichtsturm	0	0
31001_2052	Einkaufszentrum	0	1	31001_2721	Scheune	0	0	51001_1004	Kontrollturm	0	0
31001_2053	Markthalle	0	1	31001_2723	Schuppen	0	0	51001_1005	Kühlturm	0	0
31001_2054	Laden	0	1	31001_2724	Stall	0	0	51001_1006	Leuchtturm	0	0
31001_2055	Kiosk	0	1	31001_2726	Scheune und Stall	0	0	51001_1007	Feuerwachturm	0	0
31001_2056	Apotheke	0	1	31001_2727	Stall für Tiergrößnahrung	0	0	51001_1008	Sendeturm	0	0
31001_2060	Messehalle	0	0	31001_2728	Reithalle	0	0	51001_1009	Stadt-, Torturm	0	0
31001_2070	Gebäude für Beherbergung	0	1	31001_2729	Wirtschaftsgebäude	0	1	51001_1010	Förderturm	0	0
31001_2071	Hotel, Motel, Pension	0	1	31001_2732	Almhütte	0	0	51001_1011	Bohturm	0	0
31001_2072	Jugendherberge	0	1	31001_2735	Jagdhaus, Jagdhütte	0	0	51001_1012	Schloss-, Burgturm	0	0
31001_2073	Hütte (mit Übernachtungsmöglichkeit)	0	0	31001_2740	Treibhaus, Gewächshaus	0	0	51001_9998	Nach Quellenlage nicht zu spezifizieren	0	0
31001_2074	Campingplatzgebäude	0	1	31001_2741	Treibhaus	0	0	51001_9999	Sonstiges	0	0
31001_2080	Gebäude für Bewirtung	0	1	31001_2742	Gewächshaus, verschiebar	0	0	51002_1215	Biogasanlage	0	0
31001_2081	Gaststätte, Restaurant	0	1	31001_3000	Gebäude für öffentliche Zwecke	0	1	51002_1220	Windrad	0	0
31001_2082	Hütte (ohne Übernachtungsmöglichkeit)	0	0	31001_3010	Verwaltungsgebäude	0	1	51002_1230	Solarzellen	0	0
31001_2083	Kantine	0	1	31001_3011	Parlament	0	1	51002_1250	Mast	0	0
31001_2090	Freizeit- und Vergnügungsstätte	0	1	31001_3012	Rathaus	0	1	51002_1251	Freileitungsmast	0	0
31001_2091	Festsaal	0	1	31001_3013	Post	0	1	51002_1260	Funkmast	0	0
31001_2092	Kino	0	1	31001_3014	Zollamt	0	1	51002_1280	Radioteleskop	0	0
31001_2093	Kegel-, Bowlinghalle	0	1	31001_3015	Gericht	0	1	51002_1290	Schornstein	0	0
31001_2094	Spielcasino	0	1	31001_3016	Botschaft, Konsulat	0	1	51002_1330	Kran	0	0
31001_2100	Gebäude für Gewerbe und Industrie	0	1	31001_3017	Kreisverwaltung	0	1	51002_1331	Drehkran	0	0
31001_2110	Produktionsgebäude	0	0	31001_3018	Bezirksregierung	0	1	51002_1332	Portalkrant	0	0
31001_2111	Fabrik	0	0	31001_3019	Finanzamt	0	1	51002_1333	Laufkran	0	0
31001_2112	Betriebsgebäude	0	1	31001_3020	Gebäude für Bildung und Forschung	0	1	51002_1340	Trockendock	0	0
31001_2113	Brauerei	0	1	31001_3021	Allgemein bildende Schule	0	1	51002_1350	Hochofen	0	0
31001_2114	Brennerei	0	1	31001_3022	Berufsbildende Schule	0	1	51002_1400	Umformer	0	0
31001_2120	Werkstatt	0	0	31001_3023	Hochschulgebäude (Fachhochschule, Universität)	0	1	51002_1999	Sonstiges	0	0
31001_2121	Sägewerk	0	0	31001_3024	Forschungsinstitut	0	1	51003_1201	Silo	0	0
31001_2130	Tankstelle	0	1	31001_3030	Gebäude für kulturelle Zwecke	0	1	51003_1205	Tank	0	0
31001_2131	Waschstraße, Waschanlage, Waschhalle	0	1	31001_3031	Schloss	0	0	51003_1206	Gasometer	0	0
31001_2140	Gebäude für Vorratshaltung	0	0	31001_3032	Theater, Oper	0	1	51003_1999	Sonstiges	0	0
31001_2141	Kühlhaus	0	0	31001_3033	Konzertgebäude	0	1	51006_1430	Zuschauertribüne	0	0
31001_2142	Speichergebäude	0	0	31001_3034	Museum	0	1	51006_1431	Zuschauertribüne, überdacht	0	0
31001_2143	Lagerhalle, Lagerschuppen, Lagerhaus	0	0	31001_3035	Rundfunk, Fernsehen	0	1	51006_1432	Zuschauertribüne, nicht überdacht	0	0
31001_2150	Speditionsgebäude	0	0	31001_3036	Veranstaltungsgebäude	0	1	51006_1440	Stadion	0	0
31001_2160	Gebäude für Forschungszwecke	0	1	31001_3037	Bibliothek, Bücherei	0	1	51006_1470	Sprungschanze (Anlauf)	0	0
31001_2170	Gebäude für Grundstoffgewinnung	0	1	31001_3038	Burg, Festung	0	0	51006_1490	Gradierwerk	0	0
31001_2171	Bergwerk	0	0	31001_3040	Gebäude für religiöse Zwecke	0	1	51006_1999	Sonstiges	0	0
31001_2172	Saline	0	0	31001_3041	Kirche	0	1	51007_1100	Historische Wasserleitung	0	0
31001_2180	Gebäude für betriebliche Sozialeinrichtung	0	1	31001_3042	Synagoge	0	1	51007_1110	Aquädukt	0	0
31001_2200	Sonstige Gebäude für Gewerbe und Industrie	0	1	31001_3043	Kapelle	0	1	51007_1210	Wachturm	0	0
31001_2210	Mühle	0	0	31001_3044	Gemeindehaus	0	1	51007_1400	Befestigung (Burgruine)	0	0
31001_2211	Windmühle	0	0	31001_3045	Gotteshaus	0	1	51007_1410	Burg	0	0
31001_2212	Wassermühle	0	0	31001_3046	Moschee	0	1	51007_1500	Historische Mauer	0	0
31001_2213	Schopfwerk	0	0	31001_3047	Tempel	0	1	51007_1510	Stadtmauer	0	0
31001_2220	Wetterstation	0	0	31001_3048	Kloster	0	1	51007_1520	Sonstige historische Mauer	0	0
31001_2310	Gebäude für Handel und Dienstleistung mit Wohnen	0	1	31001_3050	Gebäude für Gesundheitswesen	0	1	51007_9999	Sonstiges	0	0
31001_2320	Gebäude für Gewerbe und Industrie mit Wohnen	0	1	31001_3051	Krankenhaus	0	1	51009_1610	Überdachung	0	0
31001_2400	Betriebsgebäude zu Verkehrsanlagen (allgemein)	0	0	31001_3052	Heilanstalt, Pflegeanstalt, Pflegestation	0	1	51009_1611	Carpot	0	0
31001_2410	Betriebsgebäude für Straßenverkehr	0	0	31001_3053	Ärztehaus, Poliklinik	0	1	51009_1700	Mauer	0	0
31001_2411	Strassenmeisterei	0	0	31001_3060	Gebäude für soziale Zwecke	0	1	51009_1750	Denkmal	0	0
31001_2412	Warteihalle	0	0	31001_3061	Jugendfreizeithaus	0	1	51009_9999	Sonstiges	0	0
31001_2420	Betriebsgebäude für Schienenverkehr	0	0	31001_3062	Freizeit-, Vereinsheim, Dorfgemeinschafts-, Bürgerhaus	0	1	52003_1010	Schiffsshebewerk	0	0
31001_2421	Bahnwärterhaus	0	0	31001_3063	Seniorenfreizeitstätte	0	1	52003_1020	Kammerschleuse	0	0
31001_2422	Lokschuppen, Wagenhalle	0	0	31001_3064	Obladoseinhelm	0	1	53001_1800	Brücke	0	0
31001_2423	Stellwerk, Blockstelle	0	0	31001_3065	Kinderkrippe, Kindergarten, Kindertagesstätte	0	1	53001_1806	Drehbrücke	0	0
31001_2424	Betriebsgebäude des Güterbahnhofs	0	0	31001_3066	Asylbewerberheim	0	1	53001_1807	Hebebrücke	0	0
31001_2430	Betriebsgebäude für Flugverkehr	0	0	31001_3070	Gebäude für Sicherheit und Ordnung	0	1	53001_1808	Zugbrücke	0	0
31001_2431	Flugzeughalle	0	0	31001_3071	Polizei	0					



a Amtliche Basiskarte (ABK)



b ALKIS + LANUV + OSM

ALKIS	OSM
LANUV	Alle zsm

ALKIS + LANUV

ALKIS + OSM

LANUV + OSM



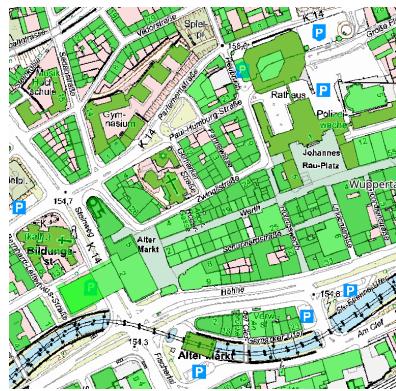
d Hausumringe ALKIS



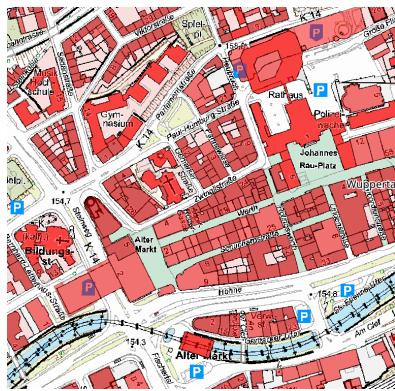
e Hausumringe LANUV



f Hausumringe OSM



g ABK + ALKIS



h ABK + LANUV



i ABK + OSM



j ALKIS + LANUV



k ALKIS + OSM



l OSM + LANUV

106

Abbildung A.4 Vergleich der Hausumringe-Geometrie in den Datensätzen (ALKIS, LANUV, OSM), Detailansicht