

# Räumlich hoch aufgelöste Analyse des technischen Potenzials von Wärmepumpen zur dezentralen Wärmeversorgung der Wohngebäude in Deutschland

Simon Greif

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen  
Universität München zur Erlangung eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Sören Schöbel-Rutschmann

Prüfer\*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner
2. Prof. Dr.-Ing. Werner Lang

Die Dissertation wurde am 22.03.2023 bei der Technischen Universität München eingereicht  
und durch die TUM School of Engineering and Design am 02.06.2023 angenommen.

# Danksagung

Zuerst möchte ich mich herzlich bei meinem Doktorvater Herr Prof. Ulrich Wagner bedanken. Ihre direkte und offene Art hat mich im Laufe der letzten Jahre immer wieder weitergebracht.

Danke Herr Prof. Wolfgang Mauch, dem langjährigen Geschäftsführer der Forschungsstelle für Energiewirtschaft, für das Vertrauen, dass Sie mir an der Forschungsstelle für Energiewirtschaft entgegengebracht haben.

Ein herzlicher Dank richtet sich an meinen Mentor Herr Prof. Werner Schenk. Mit Ihren Beiträgen aus der Praxis haben Sie meine Arbeit stets bereichert.

Der Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg und den weiteren Partner dieses Promotionsprojekts möchte ich danken, dass sie dieses Vorhaben möglich gemacht haben.

Ein großer Dank geht an die KollegInnen der FfE, insbesondere Timo Limmer, Jochen Conrad, Steffen Fattler und Alexander Bogensperger sowie allen Studierenden, die zu diesem Erfolg beigetragen haben.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, allen voran meiner Frau, für die bedingungslose Unterstützung in diesem Lebensabschnitt.

# Kurzfassung

Wärmepumpen gelten als Schlüsseltechnologie der Energiewende, um die in Deutschland weit verbreiteten Öl- und Gaskessel zu ersetzen. Für die Wärmebereitstellung nutzen sie zum Großteil Umweltwärme, die in ausreichendem Umfang lokal erschließbar sein muss.

Vor diesem Hintergrund wird das technische Potenzial von Wärmepumpen zur dezentralen Wärmeversorgung der Wohngebäude in Deutschland quantifiziert. Dazu werden Modelle entwickelt, die den Bedarf und das Angebot an Wärmeenergie anhand von Geo- und Statistikdaten bundesweit je Wohngebäude abbilden. Durch Gegenüberstellung der beiden Größen wird je Gebäude und Wärmequelle überprüft, ob der Wärmebedarf vollständig mit einer Wärmepumpe bereitgestellt werden kann. Der Wärmebedarf der 17,1 Millionen analysierten Gebäude basiert auf Daten zu der Grundfläche, der Höhe, dem Baualter und dem spezifischen Wärmeenergiebedarf. Um den Gebäudebestand in seiner Heterogenität darzustellen, erfolgt eine Kalibrierung, die Unterschiede des Sanierungsstands, Nutzerverhaltens und Klimas abbildet. Auf der Seite des Energieangebots werden die Wärmequellen Luft, Erde sowie der Kombination aus Solar-Luft-Kollektor und Eisspeicher untersucht, wobei der Anteil elektrischer Energie einbezogen wird. Das Potenzial von Luftwärmepumpen wird in Übereinstimmung mit den Schallschutzanforderungen bestimmt. Auf Basis von Geodaten werden potenzielle Anlagenstandorte definiert und unter Beachtung von Abschirmung, Reflexion und Beugung von Schall der limitierende Abstand zur benachbarten Wohnbebauung ermittelt. Mit einer Regressionsanalyse der Schallemissionen und unter Einhaltung eines Immissionsrichtwerts wird das Energieangebot von Luftwärmepumpen berechnet. Weiter werden die Einsatzmöglichkeiten von Erdsonden und Erdkollektoren analysiert, wobei die Grundstücksfläche und einzuhaltende Abstände geometrisch modelliert werden. Anhand einer statistischen Auswertung werden konkurrierende Nutzungen berücksichtigt. Die Entzugsarbeit wird in Abhängigkeit von Bodenart und Klimazone bzw. Bohrtiefe abgebildet. Als Einschränkung werden Gebiete, die dem Wasserschutz unterliegen oder Vorkommen von Gips oder Anhydrid aufweisen, beachtet. Im Solar/Eisspeicher-Modell wird die verfügbare Dachfläche mittels der Gebäudegrundfläche sowie statistischen Daten beschrieben. Die mögliche Einbringung von Eisspeichern im Außenbereich wird analog zum Erdwärme-Modell bestimmt. Für die Entzugsarbeit werden Herstellerdaten einbezogen. Als Anwendung der Modelle wird die Entwicklung des Wärmepumpenbestands, des Strombedarfs und der Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen analysiert.

Im Ergebnis sind 65 % der Wohngebäude für Luft-, 47 % für Erdsonden-, 24 % für Erdkollektor-, 37 % für Solar-/Eisspeicherwärmepumpen und 75 % für mindestens eine der Varianten geeignet. In ländlichen Gemeinden und Kleinstädten ist der Anteil höher, in Mittel- und Großstädten niedriger. Das Angebot der analysierten Wärmequellen ist für den Großteil der Ein-/ Zweifamilienhäuser, kleinen Mehrfamilienhäuser und Doppelhaushälften, weniger häufig für Reihenhäuser und selten für große Mehrfamilienhäuser ausreichend. Vielfach können Wärmepumpen auch in teil- oder unsanierten Bestandsgebäuden eingesetzt werden, wobei Maßnahmen wie der Austausch von Heizkörpern einen effizienten Betrieb gewährleisten. Die Höhe des Potenzials nimmt perspektivisch zu und stellt auch langfristig keine Limitierung für die Energiewende dar. Aufgrund der Überschneidung der Potenziale können die Wärmequellen unterschiedliche Rollen einnehmen. Neben der Energiesystemanalyse können die Ergebnisse auch in der kommunalen Wärmeplanung eingesetzt werden.

# Abstract

Heat pumps are considered a key technology in the transition of the energy system in order to replace oil and gas boilers that are prevalent in Germany. To provide heat, they largely use environmental heat, which must be accessible locally in sufficient quantities.

In this context, the technical potential of heat pumps for the decentralized heat supply of residential buildings in Germany is quantified. For this purpose, models are being developed that show the demand and supply of heat energy for each residential building on the basis of geo- and statistical data for the whole of Germany. By comparing the two quantities, it is examined for each building and heat source whether the heat demand can be completely provided by a heat pump. The heat demand of the 17.1 million buildings analysed is based on data regarding floor area, height, building age and specific heat energy demand. In order to represent the building stock in its heterogeneity, a calibration is carried out that reflects the differences in renovation conditions, user behaviour and climate. On the energy supply side, the heat sources air, earth, and the combination of solar-air-collector and ice storage are investigated, including the share of electrical energy. The potential of air-source heat pumps is determined in accordance with sound immission limits. Based on geodata, potential plant locations are identified and the limiting distance to neighbouring residential buildings is determined, taking into consideration the shielding, reflection and diffraction of sound. With a regression analysis of the sound emissions and in compliance with an immission reference value, the energy supply of air-source heat pumps is calculated. Furthermore, the possible applications of borehole heat exchangers and ground heat collectors are analysed, whereby the area of the site and the distances to be maintained are geometrically determined. A statistical evaluation is used to take competing uses into account. The extraction energy is modelled in dependence on the soil type and the climate zone respectively the depth of the borehole. Water protection areas or regions that contain gypsum or anhydrite are considered as restrictions. In the solar/ice storage model, the available roof area is described using the building footprint and statistical data. The possible integration of outdoor ice storage is determined analogically to the geothermal model. For the extraction energy, manufacturer data are included. As an application of the models, the development of the heat pump stock, the electricity demand and the reduction of CO<sub>2</sub>-emissions are analysed.

As a result, 65% of residential buildings are suitable for air-source heat pumps, 47% for heat pumps with borehole heat exchangers, 24% for heat pumps with ground heat collectors, 37% for heat pumps with solar-air-collectors and ice-storages, and 75% for at least one of the variants. The percentage is higher in rural communities and small towns, and lower in medium-sized and large cities. The supply of analysed heat sources is sufficient for the majority of single/ two-family houses, small multifamily houses and semidetached houses, less frequently for terraced houses and rarely for large multifamily houses. In many cases, heat pumps can also be used in partially renovated or unrenovated buildings, with such measures as the replacement of radiators ensuring efficient operation of the systems. The level of potential is increasing in perspective and does not represent a limitation for the transformation of the energy system, even in the long term. Due to the overlapping of the potentials, the heat sources can take on different roles. In addition to the energy system analysis, the results can also be used in municipal heat planning.

# Inhalt

Abbildungen.....	viii
Tabellen .....	xii
1 Einleitung .....	1
1.1 Motivation und Ziel .....	1
1.2 Stand der Forschung.....	2
1.3 Forschungsfragen.....	9
2 Überblick über die Methodik .....	10
3 Voranalyse .....	17
3.1 Definition technisches Potenzial.....	17
3.2 Definition des Untersuchungsrahmens.....	18
3.2.1 Untersuchte Gebäude .....	18
3.2.2 Art der Wärmeversorgung .....	19
3.2.3 Auswahl des Energieträgers.....	20
3.2.4 Auswahl der Wärmequellen.....	22
3.3 Zwischenfazit .....	26
4 Gebäude-Modell.....	27
4.1 Grundlagen.....	27
4.1.1 Wärmeenergiebedarf - Begriffsdefinition .....	27
4.1.2 OpenStreetMap.....	28
4.1.3 Zensus-Daten.....	29
4.1.4 Gebäudehöhe .....	30
4.1.5 Stadt- bzw. Gemeindetyp .....	30
4.2 Methodik.....	31
4.2.1 Gebäudetyp .....	31
4.2.2 Wohnfläche.....	42
4.2.3 Spezifischer Wärmeenergiebedarf .....	45
4.3 Ergebnisse.....	50
4.4 Zwischenfazit .....	57

5 Anlagen-Modell.....	58
5.1 Grundlagen.....	58
5.2 Methodik.....	60
5.2.1 Jahresarbeitszahl.....	60
5.2.2 Heizlast und Volllaststunden .....	63
5.3 Ergebnisse.....	64
5.4 Zwischenfazit .....	66
6 Luftwärme-Modell .....	67
6.1 Grundlagen.....	67
6.1.1 Erschließung der Wärmequelle.....	67
6.1.2 Grundlagen Schall .....	68
6.2 Methodik.....	70
6.2.1 Untersuchungsrahmen .....	70
6.2.2 Limitierender Abstand zu benachbarten Wohngebäuden .....	73
6.2.3 Immissionsrichtwerte für Schall .....	78
6.2.4 Schallemissionen von Luftwärmepumpen .....	79
6.2.5 Wärmeenergieangebot .....	85
6.3 Ergebnisse.....	87
6.3.1 Zwischenergebnisse.....	87
6.3.2 Potenzial von Luftwärmepumpen.....	89
6.3.3 Sensitivitätsanalyse.....	94
6.4 Zwischenfazit .....	97
7 Erdwärme-Modell .....	98
7.1 Grundlagen.....	98
7.2 Methodik.....	99
7.2.1 Untersuchungsrahmen .....	100
7.2.2 Grundstücksfläche .....	101
7.2.3 Erdkollektorfläche.....	102
7.2.4 Anzahl Erdsonden .....	103
7.2.5 Nutzbarkeit der Grundstücksfläche.....	105
7.2.6 Wärmeenergieangebot .....	107
7.2.7 Ausschlussgebiete .....	110
7.3 Ergebnisse.....	112
7.3.1 Zwischenergebnisse.....	112
7.3.2 Potenzial von Erdwärmepumpen.....	117

7.3.3	Sensitivitätsanalyse.....	122
7.4	Zwischenfazit .....	124
8	Solar/Eisspeicher-Modell.....	125
8.1	Grundlagen.....	125
8.2	Methodik.....	126
8.2.1	Untersuchungsrahmen .....	127
8.2.2	Nutzbare Dachfläche.....	128
8.2.3	Realisierbares Eisspeichervolumen.....	129
8.2.4	Wärmeenergieangebot .....	130
8.3	Ergebnisse.....	132
8.3.1	Zwischenergebnisse.....	132
8.3.2	Potenzial von Solar/Eisspeicherwärmepumpen.....	135
8.3.3	Sensitivitätsanalyse.....	139
8.4	Zwischenfazit .....	141
9	Gesamtpotenzial .....	142
10	Entwicklung des Wärmepumpenbestands .....	147
10.1	Zukünftiges Potenzial.....	147
10.2	Zielpfad und Technologiezusammensetzung.....	151
10.3	Resultierender Strombedarf.....	154
10.4	Verminderung von CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	155
10.5	Zwischenfazit .....	157
11	Fazit und Ausblick .....	159
12	Literatur .....	163
13	Veröffentlichungen des Autors.....	176
14	Anhang.....	178

# Abbildungen

Abbildung 2-1:	Methodik-Überblick: Quantifizierung technisches Potenzial von Wärmepumpen	12
Abbildung 3-1:	CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktoren für Strom und Gas im Zeitraum 2020-2050 [62]	20
Abbildung 3-2:	Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen für Gas- und Elektrowärmepumpen 2020 bis 2050	21
Abbildung 4-1:	Begriffsdefinition Wärmeenergiebedarf [67]	27
Abbildung 4-2:	Anzahl der Gebäudepolygone in OpenStreetMap 2008 - 2022 [76]	28
Abbildung 4-3:	Zunahme der Gebäudepolygone in OpenStreetMap je Postleitzahl 2021 - 2022, eigene Darstellung aus Daten von [77] und [37]	29
Abbildung 4-4:	Unterscheidung von Gebäude und Gebäudekomplex	29
Abbildung 4-5:	Überblick Methodik Gebäude-Modell	31
Abbildung 4-6:	Landnutzung – Abdeckung von URBAN Atlas [84] und CORINE Land Cover [83], Abbildung aus [82]	33
Abbildung 4-7:	Ausschluss von Nichtwohngebäuden, eigene Darstellung auf Basis von [82]	34
Abbildung 4-8:	Siedlungsraum je Postleitzahl, eigene Darstellung auf Basis von [45] und [37]	37
Abbildung 4-9:	Absolute Häufigkeit nach Höhe und Bruttogrundfläche je Gebäudetyp und Datenquelle, Darstellung auf Basis von [82]	40
Abbildung 4-10:	Validierung Gebäudetyp-Klassifikation mit manuell erhobenen Daten (oben) und Daten aus [45] (unten)	41
Abbildung 4-11:	Stockwerkszahl je Gebäudetyp im Referenzdatensatz, eigene Darstellung auf Basis von [45], [38], [39], [40], [41], [42] und [43]	44
Abbildung 4-12:	Verhältnis Wohnfläche zu Bruttogrundfläche, eigene Darstellung aus Daten von [86] und [87]	45
Abbildung 4-13:	Mittlerer spezifischer Wärmeenergiebedarf je Gebäudetyp und Baualter, eigene Darstellung auf Basis von [88] und [47]	46
Abbildung 4-14:	Homogenität des Baualters in 100x100 m Rasterzellen, eigene Darstellung auf Basis von [45] und [88]	48
Abbildung 4-15:	Abweichung der Gradtagzahl je Landkreis gegenüber Mittelwert, eigene Darstellung auf Basis von [91]	49
Abbildung 4-16:	Verteilung des spezifischen Wärmeenergiebedarfs: Modellergebnis und Referenz, eigene Darstellung aus Daten von [92]	50
Abbildung 4-17:	Anzahl Wohngebäude je Gebäudetyp – Modellergebnis und Referenz, eigene Darstellung mit Daten von [47] und [48]	51
Abbildung 4-18:	Abweichung Anzahl Wohngebäude je Landkreis: Vergleich von Modell und Referenz, eigene Darstellung auf Basis von [48]	52
Abbildung 4-19:	Wohnfläche je Gebäudetyp – Modellergebnis und Validierung, eigene Darstellung mit Daten von [48]	53
Abbildung 4-20:	Wärmeenergiebedarf je Gebäudetyp – Modellergebnis und Validierung, eigene Darstellung aus Daten von [59]	54
Abbildung 4-21:	Zusammensetzung der 17,1 Mio. analysierten Gebäude der Potenzialanalyse	54
Abbildung 4-22:	Wärmeenergiebedarf je Gebäudetyp	55
Abbildung 4-23:	Anzahl Gebäude nach spezifischem Wärmeenergiebedarf	56
Abbildung 5-1:	Anteil Umweltwärme zu Leistungszahl, eigene Darstellung nach [68]	59
Abbildung 5-2:	Bilanzgrenze Jahresarbeitszahl [65]	60



Abbildung 5-3:	Methodik-Überblick Jahresarbeitszahl .....	61
Abbildung 5-4:	Volllaststunden in Abhängigkeit des spezifischen Wärmeenergiebedarfs, eigene Darstellung auf Basis von [59] .....	64
Abbildung 5-5:	Jahresarbeitszahl von Luftwärmepumpen in Ein-/ Zweifamilienhäusern mit Baujahr vor 1979 .....	65
Abbildung 5-6:	Heizlast je Gebäudetyt .....	66
Abbildung 6-1:	Unterscheidung von Schallemission und -immission [50].....	68
Abbildung 6-2:	A-Bewertung von Schallpegeln [50] .....	69
Abbildung 6-3:	Überblick Methodik Luftwärme-Modell.....	70
Abbildung 6-4:	Zweidimensionale Nachbarschaftsanalyse .....	71
Abbildung 6-5:	Nicht berücksichtigte Wege der Schallausbreitung.....	71
Abbildung 6-6:	Schema zur Ermittlung des minimalen Abstands je Emissionsort.....	73
Abbildung 6-7:	Raumwinkelmaß in Abhängigkeit des Aufstellorts [50].....	74
Abbildung 6-8:	Minimaler Abstand je Aufstellort (blau), optimaler Aufstellort (Stern) sowie limitierender Abstand (grün), Darstellung auf Basis von [37] .....	77
Abbildung 6-9:	Richtwerte Schall für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden; eigene Darstellung aus Daten von [49].....	78
Abbildung 6-10:	Tagebetrieb: Schalleistungspegel zu Heizleistung (A-5/W50), eigene Berechnungen und Daten aus [118] .....	81
Abbildung 6-11:	Nachtbetrieb: Schalleistungspegel zu Heizleistung (A-5/W50), eigene Berechnungen und Daten aus [118] .....	82
Abbildung 6-12:	Funktionaler Zusammenhang von Schalleistungspegel und Heizleistung, eigene Berechnungen und Daten aus [118] .....	83
Abbildung 6-13:	Differenzierung von Anlagen mit hohen und geringen Schalleistungspegel im Nachtbetrieb, eigene Berechnungen und Daten aus [118] .....	84
Abbildung 6-14:	Differenzierung des Schalleistungspegels nach Bauart im Nachtbetrieb, eigene Berechnungen und Daten aus [118] .....	84
Abbildung 6-15:	Funktionaler Zusammenhang zwischen Entfernung von Emissions- zu Immissionsort und Heizleistung (A-5/W50) unter Einhaltung der Schallschutzanforderungen bei einem Immissionsrichtwert (Nacht) von 35 dB(A) .....	86
Abbildung 6-16:	Limitierender Abstand vom mittleren Aufstellort zum Nachbargebäude je Gebäudetyt.....	87
Abbildung 6-17:	Wärmeenergieangebot Luftwärmepumpe je Gebäudetyt (mittlerer Aufstellort)	88
Abbildung 6-18:	Potenzial für Luftwärmepumpen je Gebäudetyt (mittlerer Aufstellort) .....	89
Abbildung 6-19:	Potenzial für Luftwärmepumpen je Landkreis (mittlerer Aufstellort).....	90
Abbildung 6-20:	Potenzial für Luftwärmepumpen je Stadt- bzw. Gemeindetyp .....	91
Abbildung 6-21:	Potenzial für Luftwärmepumpen in Abhängigkeit des spezifischen Wärmeenergiebedarfs.....	92
Abbildung 6-22:	Bereitstellbarer Wärmeenergiebedarf durch Luftwärmepumpen je Gebäudetyt	93
Abbildung 6-23:	Potenzial für Luftwärmepumpen – Varianten des Anlagenstandorts.....	94
Abbildung 6-24:	Potenzial Luftwärmepumpen – Varianten zur Höhe der Schallemissionen .....	95
Abbildung 6-25:	Anteil der Gebäude gegenüber dem Verhältnis von Wärmeenergiebedarf zu Wärmeenergieangebot Luftwärmepumpe.....	96
Abbildung 7-1:	Überblick Methodik Erdwärme-Modell.....	99
Abbildung 7-2:	Approximation von Grundstücken, Darstellung auf Basis von [37] .....	102
Abbildung 7-3:	Maximale Grundstücksfläche Erdkollektor, Darstellung auf Basis von [37] .....	103

Abbildung 7-4:	Vorgabe bzw. Empfehlung zum Abstand von Bohrloch zu Grundstücksgrenze, eigene Darstellung auf Basis von [137], [140], [142], [143], [144], [145] und [146]	104
Abbildung 7-5:	Ermittlung der maximalen Anzahl von Erdsonden, Darstellung auf Basis von [37]	105
Abbildung 7-6:	Nutzbarkeit der Grundstücksfläche für Erdwärme je Siedlungsraum	106
Abbildung 7-7:	Hauptbodenarten in Deutschland, eigene Darstellung aus Daten von [148]	107
Abbildung 7-8:	Verteilung der Bohrtiefe in Deutschland (außerhalb von Bayern), eigene Darstellung auf Basis von Annahmen und Daten nach [151]	109
Abbildung 7-9:	Verteilung der Bohrtiefe in Bayern, eigene Darstellung auf Basis von Annahmen und Daten nach [151]	109
Abbildung 7-10:	Wasserschutzgebiete und Vorkommen von Gips oder Anhydrid, eigene Darstellung von Daten aus [155] und [154]	111
Abbildung 7-11:	Grundstücksfläche je Gebäudetyp	112
Abbildung 7-12:	Grundstücksfläche – Modell vs. Flurstücke, eigene Darstellung auf Basis von Daten nach [141]	113
Abbildung 7-13:	Verfügbare Fläche für Erdkollektoren je Gebäudetyp	114
Abbildung 7-14:	Anzahl möglicher Erdsonden je Gebäudetyp	115
Abbildung 7-15:	Wärmeenergieangebot von Erdsonden- bzw. Erdkollektorwärmepumpen je Gebäudetyp	116
Abbildung 7-16:	Potenzial für Erdsonden- und Erdkollektorwärmepumpen je Gebäudetyp	117
Abbildung 7-17:	Potenzial für Erdsondenwärmepumpen je Landkreis	118
Abbildung 7-18:	Potenzial für Erdsonden- und Erdkollektorwärmepumpen je Stadt- bzw. Gemeindetyp	119
Abbildung 7-19:	Potenzial für Erdsondenwärmepumpen in Abhängigkeit des spezifischen Wärmeenergiebedarfs	120
Abbildung 7-20:	Bereitstellbarer Wärmeenergiebedarf durch Erdsonden- bzw. Erdkollektorwärmepumpen je Gebäudetyp	121
Abbildung 7-21:	Anteil der Gebäude gegenüber dem Verhältnis von Wärmeenergiebedarf zu Wärmeenergieangebot Erdsondenwärmepumpe	122
Abbildung 8-1:	Überblick Methodik Solar/Eisspeicher-Modell	126
Abbildung 8-2:	Nutzbare Dachfläche zu Bruttogrundfläche des Gebäudes je Gebäudetyp, eigene Darstellung auf Basis von Daten nach [51] und [159]	128
Abbildung 8-3:	Platzbedarf für Baugrube eines Eisspeichers mit 60 ° Böschungswinkel	130
Abbildung 8-4:	Dimensionierung Solar-Luft-Kollektor, eigene Darstellung auf Basis von [157] und [158]	131
Abbildung 8-5:	Dimensionierung Eisspeicher, eigene Darstellung auf Basis von [157], [158] und [162]	131
Abbildung 8-6:	Nutzbare Dachfläche für Solar-Luft-Kollektoren je Gebäudetyp	132
Abbildung 8-7:	Mögliches Eisspeichervolumen je Gebäudetyp	133
Abbildung 8-8:	Wärmeenergieangebot von Solar/Eisspeicherwärmepumpen je Gebäudetyp	134
Abbildung 8-9:	Potenzial für Solar/Eisspeicherwärmepumpen je Gebäudetyp	135
Abbildung 8-10:	Potenzial für Solar/Eisspeicherwärmepumpen je Landkreis	136
Abbildung 8-11:	Potenzial für Solar/Eisspeicherwärmepumpen je Stadt- bzw. Gemeindetyp	137
Abbildung 8-12:	Potenzial für Solar/Eisspeicherwärmepumpen in Abhängigkeit des spezifischen Wärmeenergiebedarfs	137
Abbildung 8-13:	Bereitstellbarer Wärmeenergiebedarf durch Solar/Eisspeicherwärmepumpen je Gebäudetyp	138

Abbildung 8-14:	Anteil der Gebäude gegenüber dem Verhältnis von Wärmeenergiebedarf zu Wärmeenergieangebot Solar/Eisspeicherwärmepumpe.....	139
Abbildung 9-1:	Potenzial je Wärmequelle und gesamt im Jahr 2022.....	142
Abbildung 9-2:	Zusammensetzung des Potenzials aller untersuchten Wärmequellen .....	143
Abbildung 9-3:	Potenzial aller untersuchten Wärmequellen (Luft, Erde oder Solar/Eisspeicher) je Gebäudetyp.....	144
Abbildung 9-4:	Potenzial aller untersuchten Wärmequellen (Luft, Erde oder Solar/Eisspeicher) je Stadt- bzw. Gemeindetyp.....	144
Abbildung 9-5:	Potenzial aller untersuchten Wärmequellen (Luft, Erde oder Solar/Eisspeicher) in Abhängigkeit des spezifischen Wärmeenergiebedarfs.....	145
Abbildung 9-6:	Bereitstellbarer Wärmeenergiebedarf aller untersuchten Wärmequellen (Luft, Erde oder Solar/Eisspeicher) je Gebäudetyp .....	146
Abbildung 10-1:	Potenzial je Wärmequelle und gesamt für Szenario A (Dämmung nach Trend) und Szenario B (Forcierte Dämmung) für das Jahr 2045 .....	148
Abbildung 10-2:	Anteil der Wohngebäude nach Eignung für dezentrale Wärmepumpen und Wärmebedarfsdichte für das Jahr 2045 in Szenario B .....	150
Abbildung 10-3:	Szenarien zur Bestandsentwicklung von Wärmepumpen bis zum Jahr 2050 nach [14] auf Basis von [11], [7], [8], [164] und [6].....	151
Abbildung 10-4:	Varianten zur Bestandsentwicklung dezentraler Wärmepumpen nach Wärmequelle.....	153
Abbildung 10-5:	Strombedarf dezentraler Wärmepumpen nach Dämmungsszenario und Technologievariante.....	154
Abbildung 10-6:	Reduktion von CO <sub>2</sub> -Emissionen durch Austausch bestehender Heizsysteme und CO <sub>2</sub> -Emissionen durch Strombedarf von Wärmepumpen .....	156
Abbildung 14-1:	Anteil der sanierten Bauteilflächen, Darstellung aus [59] auf Basis von [191] .....	179
Abbildung 14-2:	Stadt- und Gemeindetyp 2017 [192].....	179
Abbildung 14-3:	Jahresarbeitszahl von Erdsondenwärmepumpen in Ein-/ Zweifamilienhäusern mit Baujahr vor 1979 im Jahr 2022.....	180
Abbildung 14-4:	Potenzial für Erdkollektorzpumpen je Landkreis im Jahr 2022 .....	181
Abbildung 14-5:	Anteil der Gebäude gegenüber dem Verhältnis von Wärmeenergiebedarf zu Wärmeenergieangebot Erdkollektorzpumpen .....	182
Abbildung 14-6:	Potenzial aller untersuchten Wärmequellen (Luft, Erde oder Solar/Eisspeicher) je Landkreis im Jahr 2022.....	183

# Tabellen

Tabelle 3-1:	Kriterien zur Auswahl der zu untersuchenden Wärmequellen .....	22
Tabelle 3-2:	Wärmequellen und Eignung für den flächendeckenden Einsatz zur dezentralen Wärmeversorgung in Wohngebäuden mit Wärmepumpen .....	25
Tabelle 4-1:	Analyse von OSM-Tags zur Identifikation von Nichtwohngebäuden, eigene Auflistung aus [82] auf Basis von [37] .....	34
Tabelle 4-2:	Zusammenfassung der regelbasierten Gebäudety-Klassifikation .....	38
Tabelle 4-3:	Stockwerkszahl: Modellparameter, Stichprobe und Fehlermaß je Gebäudety....	43
Tabelle 6-1:	Varianten von Luftwärmepumpen [68] .....	67
Tabelle 6-2:	Untersuchungsrahmen Luftwärme-Modell – Effekte der Schallausbreitung, eigene Auflistung auf Basis von [116], [117] und [50] .....	72
Tabelle 6-3:	Untersuchte Varianten des Aufstellorts von Luftwärmepumpen .....	75
Tabelle 6-4:	Heizleistung von Luftwärmepumpen in Relation zu dem Betriebspunkt A2/W3579	
Tabelle 6-5:	Korrekturfaktor der Heizleistung zu dem Betriebspunkt A-5/W50 .....	80
Tabelle 7-1:	Varianten zur Erschließung von Erdwärme mit Wärmepumpen .....	98
Tabelle 7-2:	Untersuchungsrahmen Erdwärme-Modell, eigene Auflistung auf Basis von [15], [68], [70], [139] und [140]) .....	100
Tabelle 8-1:	Varianten von Solar-Luft-Kollektoren nach [156] .....	125
Tabelle 8-2:	Untersuchungsrahmen Solar/Eisspeicher-Modell, eigene Auflistung auf Basis von [67], [156], [72] und [157] .....	127
Tabelle 14-1:	Baualtersklassen (Mikrozensus-Klassen) nach [47] .....	178
Tabelle 14-2:	Breite von Straßen in besiedelten Gebieten, auf Basis von Annahmen, [188], [189] und [190] .....	178

# 1 Einleitung

Wärmepumpen gelten als Schlüsseltechnologie zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung von Gebäuden. Sie nutzen überwiegend Umweltwärme zur Wärmebereitstellung, der zum Betrieb benötigte Strom wird zunehmend aus erneuerbaren Energien erzeugt. Bei der Auswahl einer geeigneten Wärmequelle für die Beheizung eines Wohngebäudes sind verschiedene Restriktionen zu beachten. Für Luftwärmepumpen muss zur Einhaltung von Schallimmissionsrichtwerten ausreichend Abstand zu Nachbargebäuden eingehalten werden, für Erdwärmepumpen muss für die Erschließung der Wärmequelle u. a. ausreichend Grundstücksfläche vorhanden sein. Dabei stellt sich die Frage, inwiefern diese Restriktionen den flächendeckenden Einsatz von Wärmepumpen limitieren. Vor diesem Hintergrund analysiert die vorliegende Arbeit das technische Potenzial von Wärmepumpen zur dezentralen Wärmeversorgung von Wohngebäuden in Deutschland. Einleitend sind in diesem Kapitel die Motivation, das Ziel, der aktuelle Stand der Forschung und darauf aufbauenden die abgeleiteten Forschungsfragen beschrieben.

## 1.1 Motivation und Ziel

---

Energiewende bedeutet, die Treibhausgasemissionen deutlich und zeitnah zu reduzieren, um die Geschwindigkeit der globalen Erwärmung effektiv zu verringern. Neben dem motorisierten Verkehr und der Industrie ist die Wärmeversorgung von Gebäuden einer der drei größten Verursacher von Treibhausgasemissionen in Deutschland. Rund 70 % der Treibhausgasemissionen im Bereich Raumwärme- und Trinkwarmwasserbereitstellung werden durch private Haushalte verursacht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Großteil der Wohngebäude mit Erdgas oder Heizöl beheizt wird. [1]

In [2] ist das Ziel einer nahezu vollständigen Dekarbonisierung des Gebäudebestands bis zum Jahr 2050 festgeschrieben. Mit 115 Mio. Tonnen CO<sub>2e</sub> wurden die für den Gebäudebereich definierten Ziele im Jahr 2021 um 2 Mio. Tonnen verfehlt [3]. Durch das Sofortprogramm für den Gebäudesektor [3] sollen weitere Anreize für Dämmungs- und Sanierungsmaßnahmen geschaffen werden. Die seit dem Frühjahr 2022 angespannte geopolitische Lage und die in der Folge gestiegenen Preise aller Energieträger haben den Handlungsdruck für die Transformation der Wärmeversorgung weiter erhöht [4].

Vor diesem Hintergrund soll ab dem Jahr 2024 jedes neu eingebaute Heizsystem mindestens zu 65 % mit erneuerbaren Energien betrieben werden. Ab diesem Zeitpunkt sollen in Deutschland jährlich 500.000 Wärmepumpen installiert werden. Hierzu ist eine enorme Beschleunigung des Markthochlaufs erforderlich, da im Jahr 2021 mit einer Anzahl von 154.000 nur knapp 17 % der neuen Heizungen Wärmepumpen waren. Insgesamt beläuft sich der aktuelle Bestand auf rund 1 Mio. Wärmepumpen in Deutschland. [5]

Wärmepumpen können eine Schlüsselrolle im Rahmen der Energiewende einnehmen, weshalb deren Bestandsentwicklung vielfach mit Hilfe von Modellen in Szenarien abgebildet wird. Der Großteil der Klimaschutz-Szenarien (vgl. [6], [7], [8], [9], [10], [11]) geht von 14 bis 17 Mio. installierten Wärmepumpen in Kombination mit einem konsequenten Ausbau erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung bis zum Jahr 2050 aus. Der Vergleich dieser Zahlen mit den insgesamt 19,3 Mio. Wohngebäuden [12] und 2,0 Mio. beheizten bzw. gekühlten Nicht-Wohngebäuden [13] verdeutlicht, dass

dann der überwiegende Teil dieser Gebäude mit einer Wärmepumpe ausgestattet sein soll. Diese Szenarien zeigen den Handlungsbedarf zur Erreichung der gesetzten Ziele zur Treibhausgasreduktion auf. Die hohe anvisierte Marktdurchdringung wirft die Frage auf, ob es Grenzen für den Einsatz von Wärmepumpen gibt bzw. welche Wärmequellen und Technologien für diese hohe Marktdurchdringung eingesetzt werden können. Gerade in dem für die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende essenziellen Gebäudebestand kann die Vernachlässigung von Restriktionen zu praxisfernen Ergebnissen in Szenarien führen.

Das Ziel dieser Arbeit ist deshalb die Quantifizierung des technischen Potenzials von Wärmepumpen zur Wärmeversorgung von Wohngebäuden in Deutschland. Diese Frage kann nicht abstrakt, sondern nur für dedizierte Wärmequellen bzw. Technologien zur Erschließung dieser Wärmequellen beantwortet werden. Im Rahmen dieser Arbeit sollen daher Wärmequellen bzw. Technologien untersucht werden, die marktreif, zur Erreichung der Klimaziele geeignet und flächendeckend im Gebäudebestand einsetzbar sind. Anhand von Modellen sollen die Einflussfaktoren mit hoher Relevanz abgebildet werden, um Orientierungswissen für die Erstellung von Szenarien zu schaffen. Der Fokus liegt demnach auf der flächendeckenden Bewertung für alle Wohngebäude und nicht auf der abschließenden Bewertung der Möglichkeiten für einzelne Gebäude. Als Anwendung der entwickelten Methoden und Modelle werden verschiedene Szenarien für die Entwicklung des Bestands von Wärmepumpen analysiert und die Auswirkungen auf den zukünftigen Strombedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen bewertet.

## 1.2 Stand der Forschung

---

Im Folgenden werden relevante Studien beschrieben, die den aktuellen Stand der Forschung zum Thema quantitative Ermittlung des technischen Potenzials von Wärmepumpen zur dezentralen Wärmeversorgung von Wohngebäuden in Deutschland, darstellen. Hierzu wird jeweils das Erscheinungsjahr, die Institution der Autor:innen bzw. des Herausgebers und der Titel der Studie genannt sowie der Untersuchungsrahmen, die Methodik und die zentralen Ergebnisse der Potenzialanalysen zusammengefasst. Die Reihenfolge der Nennung erfolgt anhand des Erscheinungszeitpunkts absteigend. Am Ende dieses Kapitels wird ein Fazit der bisherigen Arbeiten gezogen und Forschungslücken identifiziert. Auf dieser Basis werden in Kapitel 1.3 die Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit abgeleitet.

### **2022, Fraunhofer Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie: Roadmap oberflächennahe Geothermie [14]**

In dieser Studie analysierte die Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie mit Unterstützung des Bundesverbandes Geothermie, des Bundesverbandes Wärmepumpe und der Erdwärme Gemeinschaft Bayern das technische Potenzial von Erdwärmepumpen zur Wärmeversorgung von Wohn- und Nichtwohngebäuden, die Entwicklung des Wärmepumpenmarktes und Hemmnisse bzw. Handlungsnotwendigkeiten, um eine Roadmap abzuleiten. Die Potenzialermittlung basiert dabei auf einem Bottom-up-Modell für Nordrhein-Westfalen (vgl. [15]), aktualisierten Annahmen und folgender These zur Übertragung des Ergebnisses auf des gesamte Bundesgebiet:

„Eine Übertragung der ermittelten Potenziale [von Nordrhein-Westfalen] auf das gesamte Bundesgebiet ist in grober Annäherung grundsätzlich möglich. Zwar gibt es zwischen den einzelnen Bundesländern Unterschiede hinsichtlich der regionalen geologischen Verhältnisse und der Potenziale für oberflächennahe geothermische Nutzungen, sowie der Siedlungs- und Bebauungsdichte oder der Anteile von Restriktionsflächen. Jedoch stellen die erheblichen

Restriktionsflächen von über 50 % der Landesfläche in NRW einen konservativen Ansatz dar, welcher gemittelt über die gesamte Bundesrepublik ausgerollt werden kann“ [14]

Eine quantitative Verifizierung dieser These ist nicht beschrieben. Im Ergebnis können durch Erdsondenwärmepumpen im Basisszenario 62 %, mit einer Erweiterung der Bohrtiefe auf 200 m 68 % und durch zusätzliche Schrägbohrungen unter Gebäuden 71 % des Wärmebedarfs von Gebäuden gedeckt werden. Eine weitere Erhöhung dieses Anteils um 4 Prozentpunkte wird durch den Einsatz von Grundwasserwärmepumpen sowie den Einsatz von Wärmenetzen auf Basis von Geothermie ausgewiesen. Die Summierung des bereitstellbaren Wärmeenergiebedarfs erfolgt, wie in [15] unabhängig davon, ob Gebäude vollständig mit Wärme aus Erdsonden- bzw. Grundwasserwärmepumpen versorgt werden können.

### **2020, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen: Geothermisches Informationssystem [16]**

In [16] wurde eine Plattform für Fachplaner und Behörden entwickelt, um den Planungs- bzw. Genehmigungsprozess für Erdsondenwärmepumpen zu optimieren.

„Ziel [...] ist die Entwicklung eines webbasierten offenen geothermischen Informationssystems, das Fachplanern und Behörden als einheitliche Datengrundlage zur Bemessung, Modellierung, Bewertung, Betriebsoptimierung und Plausibilitätsprüfung in Genehmigungsprozessen dienen soll. Ein Geoinformationssystem (GIS) als Grundlage integriert dabei digitale Informationen auf Gebäude- und Stadtquartiersebene mit aktuellen, teilweise dynamisch generierten geotechnischen und hydrogeologischen Daten des Untergrundes.“ [16]

Zu diesem Zweck wurden Methoden zur numerischen Simulation von Erdsonden bzw. dem umgebenden Erdreich sowie des Wärmebedarfs von Gebäuden eingesetzt. Der Fokus lag dabei auf der Zusammenstellung einer „Werkzeugkette von Gebäude-, Wärmepumpen- und Untergrundsimulationen mit der Anbindung an ein Geoportal und hinterlegte Datenbanken sowie automatisierter Datenaggregation für die Abbildung des gesamten Planungsprozesses im Einsatzbereich von Einzelanlagen bis auf Stadtquartiersebene“ [16]. Das Modell wurde für die Region Düren und Arnoldsweyer umgesetzt. Eine Einbindung in bestehende Dienste des Landes Nordrhein-Westfalen wird angestrebt. Aussagen zum technischen Potenzial von Erdsondenwärmepumpen auf Bundesebene wurden nicht getroffen.

### **2019, Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik: Entwicklung der Gebäudewärme und Rückkopplung mit dem Energiesystem in -95 % THG-Klimaszenarien [17]**

In [17] untersuchte das Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik Potenziale für zentrale und dezentrale Technologieoptionen der Wärmeversorgung mit dem Ziel eine kostenoptimale Versorgungsstruktur für ein vollständig dekarbonisiertes Energiesystem bis zum Jahr 2050 zu ermitteln. Hinsichtlich des Potenzials dezentraler Wärmepumpen wurden mit dem Fokus auf Bestandsgebäude Erdsonden- und Luft-Wasser-Wärmepumpen näher analysiert.

Bezüglich Luft-Wasser-Wärmepumpen wurden auf Basis eines Gebäudemodells Annahmen zum Potenzial je Gebäudetyp getroffen: Im Neubau sowie für voll- und teilsanierte Einfamilienhäuser sind dies 100 %, für unsanierte Ein- und Mehrfamilienhäuser 0 % und für teil- bzw. vollsanierte Mehrfamilienhäuser jeweils 27 % der Gebäude. In diesem Zusammenhang wurde die Rolle von bivalenten Luft-Wasser-Wärmepumpen, welche entweder mit einem Öl- oder Gaskessel oder einem elektrischen Heizstab ergänzt werden sowie die Rolle der Vorlauftemperaturreduktion anhand von zeitlich aufgelösten Simulationen analysiert. Die Einhaltung von Schallimmissionsgrenzwerten durch Luft-

Wasser-Wärmepumpen wurde nicht analysiert. Mit dem Verweis auf [18] wurde stattdessen angenommen, dass dies zukünftig keine Limitierung für den flächendeckenden Einsatz von Luft-Wasser-Wärmepumpen darstellt.

Das Potenzial dezentraler Erdsondenwärmepumpen basiert auf einer Detailanalyse für Nordrhein-Westfalen (vgl. [15] und nichtveröffentlichte Aktualisierungen des Wärmekatasters) und der Hochrechnung auf Deutschland mittels der Ergebnisse von [18]. Es handelt sich demnach um eine Sekundärerhebung und baut somit auf der Methodik vorangegangenen Arbeiten (vgl. Beschreibung von [15] und [18] unten). Hierbei wurden die Ergebnisse des Szenarios A (vollständige Nutzung in Wasserschutzgebieten der Zone III) von [15] je Stadt- bzw. Gemeindetyp aggregiert. Anhand der Verteilung auf die Bundesländer sowie der zukünftigen Entwicklung des technischen Potenzials nach [18] wurde anschließend eine Hochrechnung auf Deutschland vorgenommen. Dabei wurde berücksichtigt, dass sich die relativen Angaben des Potenzials in [18] auf die Nutzenergie beziehen. Bezüglich der Entwicklung der energetischen Qualität der Gebäudehülle des Gebäudebestands wurden zwei Szenarien modelliert. Im Ergebnis können Erdsondenwärmepumpen 74 % (Trend-szenario) bzw. 77 % (Ambitionierter Klimaschutz) des Endenergieverbrauchs von Wohngebäuden im Jahr 2050 bereitstellen, weshalb der Einfluss der Gebäudedämmung als gering eingestuft wurde.

### **2017, Beuth Hochschule für Technik Berlin & Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg: Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich [18]**

In dieser Studie (vgl. [18]) der Beuth Hochschule für Technik und des Instituts für Energie- und Umweltforschung wurden die Potenziale von zentralen und dezentralen Technologien zur Wärmeversorgung von Gebäuden in Deutschland, Möglichkeiten zur Kombination der Potenziale und davon abgeleitete Szenarien zur Entwicklung des Primärenergiebedarfs analysiert. Die weitere Beschreibung der Studie bezieht sich ausschließlich auf die Ermittlung der Potenziale zur dezentralen Wärmeversorgung mit Wärmepumpen. In diesem Zusammenhang wurden das Erdreich, die Außenluft und das Abwasser als Wärmequellen ausgewertet.

Um zur Quantifizierung des Potenzials das Angebot dem Bedarf an Wärmeenergie gegenüberstellen zu können, wurde basierend auf den Modellen „Wärmeatlas Deutschland“ (vgl. [19]) und „GEMOD“ (vgl. [20] und [21]) ein Gebäude-Modell entwickelt. Dieses bildet den Wärmeenergiebedarf auf Baublockebene für 17,4 Mio. Wohngebäude ab. Baublöcke grenzen sich dabei meist durch Straßen aber auch Felder, Flüsse o. ä. voneinander ab.

Die Methodik zur Ermittlung des Potenzials von Erdsondenwärmepumpen stellt eine Kombination aus Hochrechnung, Analyse räumlicher Daten und Annahmen dar. Die Anzahl realisierbarer Erdsonden wurde anhand von Hochrechnung ermittelt. Für die Abbildung der 3 Mio. Baublöcke wurde eine Stichprobe von 210 Baublöcken ausgewählt. Hierzu wurden für die 16 Bundesländer und sieben definierte Klassen der Bebauungsdichte (bebaute Fläche zu Grundfläche des Baublocks) jeweils 2 Baublöcke zufällig ausgewählt. Für diese 210 Baublöcke wurde die Anzahl der realisierbaren Erdsonden manuell erfasst. Dabei wurden die Mindestabstände zwischen Erdsonden, zu Gebäuden und zu Grundstücksgrenzen nach VDI 4640 beachtet. Darüber hinaus wurde die Nutzbarkeit der Grundstücksfläche berücksichtigt, wobei versiegelte Flächen wie Parkplätze, überbaute Grünflächen wie Spielplätze und Flächen unterhalb von Baumkronen ausgeschlossen wurden. Anhand der Stichprobe wurde mittels Regressionsanalyse ein funktionaler Zusammenhang zwischen Bebauungsdichte und Dichte der Erdsonden abgeleitet. Hiermit erfolgte die Hochrechnung der Anzahl an Erdsonden auf 3 Mio. Baublöcke. Trotz der Feststellung, dass „häufig eine sehr ungleichmäßige Verteilung der Sonden“ [18] innerhalb der Baublöcke vorlag, wurde die Anzahl der Erdsonden auf die Gebäude verteilt. Auch der Wärmebedarf bezog sich jeweils für den gesamten Baublock und bildete eine



etwaige Heterogenität der Gebäude nicht ab. Um die beiden genannten Unschärfen des Modells zu kompensieren, wurde die bereitstellbare Wärmeenergie pauschal um 15 % für Baublöcke mit ausreichender Anzahl an Erdsonden und für Baublöcke mit zu geringer Anzahl an Erdsonden um 30 % reduziert. Zur Abbildung der Bohrtiefe, wurden anhand von Interviews die mittleren Bohrtiefen von 21 über Deutschland verteilten Bohrunternehmen erfasst. Zudem wurden für die Modellierung der möglichen Bohrtiefe wasserrechtliche Vorgaben einbezogen. Speziell für Bayern führte dies zu Einschränkungen des Potenzials. Die Entzugsarbeit für Erdsonden wurde VDI 4640 entnommen, wobei die Wärmeleitfähigkeit im Erdreich für 7 Bundesländer mit Geodaten und für 9 Bundesländer mit Durchschnittswerten abgebildet wurde. Darüber hinaus wurden Geodaten der Wasserschutzgebiete einbezogen und Gebiete der Zonen I und II vollständig sowie Gebiete der Zone III zu 50 % als Ausschlussgebiete gewertet. Zur Ermittlung des Wärmeenergieangebots wurde neben der Wärmequelle die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpenanlage analysiert. Da die Potenziale für 2030 und 2050 ermittelt wurden, erfolgte dies unter Einbezug der Einflüsse einer steigenden Leistungszahl, eines sinkenden Raumwärmebedarfs bzw. eines zunehmenden Trinkwarmwasseranteils und einer zunehmenden Durchdringung von Flächenheizungen. Um den Effekt der unterschiedlichen Durchdringung von Dämmungsmaßnahmen zu quantifizieren, wurden zwei Szenarien untersucht. Im Ergebnis können aus technischer Sicht für das Trendszenario (bzw. das Klimaschutzszenario) im Jahr 2030 59 % (bzw. 62 %) und im Jahr 2050 60 % (bzw. 66 %) des Nutzenergieverbrauchs mit Erdsondenwärmepumpen bereitgestellt werden.

Der Einsatz von Erdkollektorzpumpen in Bestandsgebäuden wurde ausgeschlossen und ausschließlich für den Neubau in Betracht gezogen. Einflüsse wie die Verfügbarkeit oder Nutzbarkeit von Grundstücksflächen auf das technische Potenzial von Erdkollektorzpumpen wurden nicht quantifiziert.

Für Luft-Wasser-Wärmepumpen wurde die Einhaltung von Richtwerten für Schallimmissionen als potenzielle Limitierung genannt. Mit folgender Begründung wurde keine quantitative Analyse durchgeführt:

„Die Hersteller von Luft/Wasser-Wärmepumpen sind bestrebt, die Schallemissionen der Geräte weiter zu senken. Dazu setzen sie zum Beispiel größere Wärmetauscher mit geringeren Strömungsgeschwindigkeiten oder speziell geformte Ventilatoren ein. Auch durch Bauformen, die die Luft nach oben abblasen oder Split-Geräte, bei denen die Verdichter im Gebäude liegen, werden die Schallemissionen [sic!] vermindert. Ferner konnten in den letzten Jahren weitere Schallemissionen durch veränderte Formen der Ventilatorflügel erreicht werden. In dieser Studie werden keine harten Potenzialgrenzen aus den Lärmemissionen der Wärmepumpen abgeleitet, da angenommen wird, dass es bei künftigen Gerätegenerationen technische Lösungen dafür geben wird.“ [18]

Das Potenzial von Wärmepumpen, welche die Wärme des im Gebäude anfallenden Abwassers nutzen wird ebenfalls ausgewertet. Die Berechnung erfolgt überschlägig mit dem gesamten Nutzenergieverbrauch für Trinkwarmwasser in Wohngebäuden, einem Wirkungsgrad von 40 % (für Wärmetauscher in Duschwannen), einem angenommenen Warmwasserverlust von 20 % und einer Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe von 4. Daraus resultiert eine jährlich bereitstellbare Wärmeenergie von 22 TWh. Eine Bewertung, inwiefern dies den Wärmebedarf einzelner Gebäude decken kann, erfolgte nicht.

## **2015, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW Teil 4 – Geothermie [15]**

In [15] wurde das Potenzial von Erdsondenwärmepumpen anhand eines Bottom-up-Modells für Wohn- und Nichtwohngebäude in Nordrhein-Westfalen analysiert. Eingangs wurden auf Basis amtlicher Daten zu Flurstücken und Gebäudegrundrissen rund 4,1 Mio. Grundstücke identifiziert, die mit einem oder mehreren Gebäuden bebaut sind. Dies führte zum Ausschluss von Verkehrsflächen wie Straßen oder Wegen. Darüber hinaus wurden Wasserschutzgebiete der Zonen I und II als Ausschlussgebiete berücksichtigt. Für die Zonen III, IIIa, IIIb und IIIc wurden zwei Szenarien untersucht: Pauschale Begrenzung der Bohrtiefe auf 40 m (Szenario A) und vollständiger Ausschluss dieser Gebiete (Szenario B). Für hydrogeologisch kritische Bereiche mit Karstgestein, artesisch gespanntem Grundwasser o. ä. (vgl. [22]) wurde die Bohrtiefe pauschal auf 40 m begrenzt. Gebiete mit trockenen Lockersedimenten wurden aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit ebenfalls ausgeschlossen, wobei dies lediglich auf 2 % der Fläche von Nordrhein-Westfalen zutraf. Außerhalb von Restriktionsflächen wurde pauschal eine Bohrtiefe von 100 m angenommen. Anhand eines Geoinformationssystems wurde die Fläche der Flurstücke abzüglich der Gebäudegrundfläche ermittelt. Daraufhin wurde die maximale Anzahl an Erdsonden auf Basis einer gleich großen aber quadratischen Fläche unter Berücksichtigung der Abstände zwischen den Erdsonden und zur Grundstücksgrenze aus [23] eruiert. Mittels Simulation wurde die mögliche Entzugsarbeit verschiedener Anordnungen von Erdsonden bestimmt. Das Angebot an Energie aus Erdsonden berechnete sich aus der ermittelten Anzahl an Erdsonden, der angenommenen Bohrtiefe, der räumlich modellierten Wärmeleitfähigkeit, einer mittleren spezifischen Wärmekapazität und einer mittleren Erdreichtemperatur. Dem wurde die Wärmenachfrage der Gebäude gegenübergestellt. Anhand des Objektschlüssels wurden Wohngebäude und Nichtwohngebäuden unterschieden sowie für die Analyse irrelevante Gebäude wie Garagen ausgeschlossen. Darüber hinaus wurden Nichtwohngebäude in die drei Klassen: wohnähnliche Nutzung (wie Bürogebäude), Sondergebäude mit hohem (wie Krankenhäuser) oder niedrigem Wärmeenergiebedarf (wie Fabrikgebäude) differenziert. Für jede der vier analysierten Gebäudeklassen wurde mittels Literaturrecherche ein mittlerer spezifischer Wärmeenergiebedarf bzw. eine mittlere spezifische Heizleistung je Quadratmeter festgelegt und anhand der Jahresmitteltemperatur räumlich differenziert. Die beheizte Fläche wurde mittels konstanter Faktoren vom Gebäudevolumen abgeleitet. Der resultierende Wärmeenergiebedarf wurde Top-down validiert. Der Vergleich von Angebot und Nachfrage an Wärmeenergie je Gebäude bzw. Grundstück erfolgte unter Berücksichtigung einer angenommenen Jahresarbeitszahl. Das technische Potenzial wurde angegeben als Anteil des Wärmebedarfs, welcher anhand von Erdsondenwärmepumpen bereitgestellt werden kann, unabhängig davon, ob dieser zur alleinigen Wärmeversorgung eines Gebäudes ausreicht. Im Ergebnis können in Szenario A knapp 57 % und in Szenario B 52 % des Wärmeenergiebedarfs der 5,9 Mio. bewerteten Gebäude mit Erdsondenwärmepumpen bereitgestellt werden. Mit einem statistischen Ansatz werden zudem Neubaugebiete je Gemeinde simuliert und angenommen, dass aufgrund der Vorgaben an die energetische Qualität der Gebäudehülle eine vollständige Wärmeversorgung dieser Gebäude mit Erdsondenwärmepumpen möglich ist.

Weitere Potenzialanalysen wie [24] und [25], die vor über 10 Jahren durchgeführt wurden, werden nicht aufgeführt, da diese bzgl. der angewendeten Methodik keinen Neuigkeitswert gegenüber den erläuterten Arbeiten aufweisen.

### Informationen zum Angebot von Wärmequellen

Darüber hinaus existieren weitere Anwendungen und Projekte, welche nicht das Wärmepumpen-Potenzial durch Gegenüberstellung von Angebot und Nachfrage an Wärmeenergie ermitteln, sondern Auskunft über das Angebot bzw. deren Einflussfaktoren geben. Da sich diese i. d. R. auf eine Wärmequelle sowie ein begrenztes Gebiet beziehen, existiert eine Vielzahl solcher Anwendungen, weshalb die folgende Auflistung sich auf Titel und Herausgeber beschränkt und keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt:

- UmweltAtlas Bayern – Standortauskunft, Bayerisches Landesamt für Umwelt [26]
- Informationssystem Oberflächennahe Geothermie Baden-Württemberg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau [27]
- Geothermie in NRW – Standortcheck, Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen [28]
- Energieatlas Thüringen, Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur GmbH [29]
- ThermoMap, Projektkonsortium aus 12 europäischen Institutionen [30]
- Solaratlas, Hamburg Energie [31]
- Solaratlas Brandenburg, Wirtschaftsförderung Land Brandenburg GmbH [32]
- Solarkataster Hessen, Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen [33]

### Zwischenfazit und Forschungslücken

In diesem Abschnitt wird ein Fazit zum aktuellen Stand der Forschung (Kapitel 1.2) gezogen, wobei hierfür die für die Methodik relevanten Ebenen differenziert werden. Darauf aufbauend werden die Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit abgeleitet.

**Analysierte Wärmequellen:** Die beschriebenen Studien quantifizieren das technische Potenzial von Wärmepumpen zur dezentralen Wärmeversorgung meist nur für einzelne Wärmequellen wie Erdsonden. In diesem Kontext wurden die ebenfalls für den flächendeckenden Einsatz geeigneten Wärmequellen Außenluft oder Solar-Luft-Kollektoren mit Eisspeicher bisher nicht untersucht.

**Erreichte Detailtiefe:** Die Nutzbarkeit von Wärmequellen für Wärmepumpen hängt von verschiedenen lokalen Einflussfaktoren ab. Eine aussagekräftige Analyse sollte räumlich hochaufgelöst erfolgen. Vernachlässigungen bezüglich des Detailgrads können Auswirkungen haben, die in weiteren Schritten der Analyse nicht quantifizierbar sind. Im Folgenden sind solche Beispiele aufgeführt: In [18] wurde die Anzahl an Erdsonden für Baublöcke untersucht und festgestellt, dass „häufig eine sehr ungleichmäßige Verteilung der Sonden“ [18] innerhalb der Baublöcke vorlag. Als statistische Einheit zur Bewertung der Flächenverfügbarkeit für Erdwärme sollten demnach die Grundstücke herangezogen werden. In [15] wurde die für Erdsonden verfügbare Grundstücksfläche vereinfacht als quadratische Fläche angenommen. Diese Vereinfachung vernachlässigt die typische Lage von Gebäuden auf Grundstücken und kann vorgegebene Abstandsflächen zu Gebäuden und Grundstücksgrenzen nicht hinreichend abbilden. In [15] wurden keine Einschränkungen durch konkurrierende Nutzungen auf der Grundstücksfläche berücksichtigt, was zu einer systemischen Überschätzung des Potenzials führt.

**Räumliche Abdeckung:** Bestehende Studien analysierten meist begrenzte räumliche Gebiete wie ein Bundesland. Aussagen für die gesuchte Grundgesamtheit – alle Wohngebäude in Deutschland – basieren auf Hochrechnungen. In [18] wurde hierzu eine geschichtete Zufallsstichprobe mit geringem Umfang eingesetzt, welche 210 von 3 Mio. Baublöcken umfasst. Die entsprechende Wahrscheinlichkeit bzw. der Fehler wird nicht angegeben. Die in [14] beschriebene Übertragung der Ergebnisse ist keine Hochrechnung im Sinne der Statistik, da die Repräsentativität der Stichprobe nicht analysiert wird. Als Merkmal wird zwar der Anteil der Restriktionsflächen genannt, auf die Verteilung der Merkmalsausprägungen in der Grundgesamt wird jedoch nicht eingegangen. Zudem werden andere relevante Merkmale wie die Bohrtiefe (z. B. restriktivere Regelungen in Bayern) nicht mit einbezogen. In [16] ist zwar der Detailgrad durch die numerische Modellierung des Untergrunds sehr hoch, jedoch weicht der Fokus deutlich von der Zielsetzung dieser Arbeit ab, da ein Tool für die Planung und Genehmigung und keine bundesweite und automatisierte Bewertung des Potenzials für Deutschland angestrebt wird.

**Definition des technischen Potenzials:** In [14] und [15] wurde für die Berechnung des technischen Potenzials nicht unterschieden, ob die Wärmeversorgung eines Gebäudes vollständig mit einer Wärmequelle in Kombination mit Wärmepumpe erfolgen kann oder nur teilweise. In der Folge wurde als Potenzial ein Anteil der Wärmeenergie ausgewiesen, welcher für ein Teil der Gebäude mit weiteren Wärmequellen oder Heizsystemen ergänzt werden muss bzw. im Einzelfall auch sehr gering sein kann. Gerade für die Vielzahl an Einfamilienhäusern scheint der Einsatz mehrerer Wärmequellen unplausibel, da derartige Systeme aufgrund des hohen Aufwands kaum zum Einsatz kommen.

Zusammenfassend kann folgendes Fazit gezogen werden: Bezüglich der quantitativen Analyse beschränken sich die meisten Studien auf einzelne Wärmequellen, meist Erdsonden. Die existierenden Analysen wurden kleinräumig durchgeführt, wobei die Detailtiefe zur Abbildung relevanter Einflussfaktoren zum Teil nicht ausreichend war. Teilweise wurden relevante Einflussfaktoren nicht berücksichtigt. Ergebnisse für den gesamten Wohngebäudebestand in Deutschland basieren bisher auf

Hochrechnungen, die mit Stichproben sehr unterschiedlicher Größe durchgeführt wurden. Die notwendige Größe der Stichprobe sowie relevante Merkmale für die Hochrechnung vor dem Hintergrund eines heterogenen Gebäudebestands und lokalen Unterschieden zur Nutzbarkeit von Wärmequellen wurden nicht ausreichend untersucht.

### 1.3 Forschungsfragen

---

In Kapitel 1.2 wurden bezüglich der Quantifikation des Potenzials von Wärmepumpen zur dezentralen Wärmeversorgung von Wohngebäuden der aktuelle Stand der Forschung beschrieben sowie Forschungslücken identifiziert. Auf dieser Grundlage werden nachfolgend die Forschungsfragen abgeleitet

In der vorliegenden Arbeit soll eine technologieübergreifende Analyse der Wärmequellen erfolgen, die für einen flächendeckenden Einsatz von Wärmepumpen in Frage kommen. In Abgrenzung zu anderen Modellen wird in dieser Arbeit eine möglichst flächendeckende Modellierung (Vollerhebung) der Gebäude bzw. der für die Abbildung der Wärmequellen relevanten Merkmale angestrebt. Die Definition des Potenzials hat Auswirkungen auf die Aussage der Ergebnisse. Im Rahmen der vorliegenden Studie werden nur Gebäude in der Berechnung des Potenzials berücksichtigt, deren Wärmeversorgung vollständig mit einer Wärmequelle in Kombination mit einer Wärmepumpe möglich ist.

Somit lassen sich folgende Forschungsfragen formulieren:

- Wie kann der Wärmeenergiebedarf je Wohngebäude flächendeckend für Deutschland quantifiziert werden?
- Welche Kriterien bestimmen das Energieangebot von Wärmequellen für dezentrale Wärmepumpen maßgeblich und wie lässt sich dieses für alle Wohngebäude in Deutschland quantifizieren?
- Welcher Anteil der Wohngebäude und des Wärmeenergiebedarfs kann derzeit mit flächendeckend zur Verfügung stehenden Wärmequellen in Kombination mit Wärmepumpen dezentral versorgt werden und welche Sensitivität weisen die Ergebnisse der Potenzialanalyse auf?
- Wie kann sich das technische Potenzial von Wärmepumpen zukünftig entwickeln, wie kann dieses erschlossen werden und wie wirkt sich dies auf den Strombedarf und die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus?

## 2 Überblick über die Methodik

Das folgende Kapitel bietet einen Überblick über den methodischen Ansatz zur Quantifizierung des technischen Potenzials von Wärmepumpen zur dezentralen Wärmeversorgung des gesamten Wohngebäudebestands in Deutschland.

Das technische Potenzial von Wärmepumpen zur dezentralen Wärmeversorgung hängt stark von lokalen Gegebenheiten wie der Erschließbarkeit bzw. Nutzbarkeit der Wärmequellen im Vergleich zum benötigten Wärmeenergiebedarf ab. Deshalb ist eine aussagekräftige Potenzialermittlung nur möglich, wenn diese lokale Gegebenheiten räumlich hoch aufgelöst abgebildet werden. Der Einsatz eines Top-down-Modells scheidet damit aus. Eingangs werden deshalb verschiedene Methoden zur Erstellung eines Bottom-up-Modells diskutiert.

Grundsätzlich kann die Ermittlung des Potenzials flächendeckend je Gebäude (Vollerhebung) oder anhand einer Stichprobe (Teilerhebung) und anschließender Hochrechnung (Repräsentanzschluss) erfolgen. Entsprechend der Zielsetzung, Wärmepumpen-Potenziale zur dezentralen Wärmeversorgung zu analysieren, ist die statistische Einheit ein Gebäude. Die Grundgesamtheit stellt der gesamte Bestand an Wohngebäuden in Deutschland dar, welcher im Jahr 2020 rund 19,3 Mio. Gebäude [34] umfasst.

Eine Hochrechnung ist nur möglich, wenn die Stichprobe repräsentativ ist. Die Auswahl einer repräsentativen Stichprobe kann entweder zufällig oder bewusst erfolgen. Verfahren zur bewussten Auswahl sind mit geringerem Aufwand durchführbar, mit dem Nachteil, dass keine Wahrscheinlichkeitsaussagen getroffen werden können. Hier findet oft das Quotenverfahren Anwendung. Die Verteilung der Quotenmerkmale muss dabei in der Grundgesamtheit bekannt sein und bezüglich der Zusammensetzung der Stichprobe entsprechen. [35]

Die Verteilung der für die Potenzialermittlung relevanten Merkmale wie beispielsweise der für Luftwärmepumpen limitierende Abstand zur Nachbarbebauung sind jedoch nicht für die Grundgesamtheit bekannt. Würde für das genannte Beispiel statt dem limitierenden Abstand ein bekanntes, abstrakteres Merkmal wie die Siedlungsdichte verwendet, würde dies die konkrete räumliche Anordnung der Gebäude zueinander nicht abbilden. Diese ist jedoch für die Bewertung der Schallausbreitung essenziell. Der skizzierte Anwendungsfall zeigt, dass der Aufwand zur flächendeckenden Erhebung relevanter Merkmalsausprägungen durch das Quotenverfahren nicht reduziert werden kann.

Alternativ könnte die Stichprobe mittels zufälliger Auswahl gezogen werden. Zufällig bedeutet in diesem Kontext nicht, dass die Auswahl willkürlich oder nach eigenem Ermessen durchgeführt werden kann. Vielmehr existieren unterschiedliche Methoden wie die einfache, geschichtete oder mehrstufige Zufallsauswahl. Grundsätzlich gilt dabei: je größer die Stichprobe, desto belastbarer das Ergebnis bzw. desto kleiner der Fehler. [36]

Bei der Ermittlung einer geeigneten Stichprobengröße für die eingangs beschriebene Zielsetzung, muss die Heterogenität der Merkmalsausprägungen des Gebäudebestands (Wärmebedarf: u. a. Gebäudetypen, Wohnflächen, Baualtersklassen, Klimaregionen) bzw. der Wärmequellen (u. a. Grundstücksgrößen und -formen, Ausschlussgebiete, länderspezifische Regularien, Bodenarten, Klimazonen, Anordnung der Gebäude) berücksichtigt werden. Die Verteilung der zu analysierenden

Gebäude z. B. über die Bundesländer, Kreise und Gemeinden von Deutschland hinweg ist allen Methoden der Zufallsauswahl immanent. Dabei stellt sich die Frage, welchen Vorteil die Bewertung einer Vielzahl weit verteilter Gebäude (Teilerhebung) gegenüber der Vollerhebung mit sich bringt. Einerseits ist der Rechenaufwand zur Analyse einer reduzierten Anzahl statistischer Einheiten geringer. Andererseits muss, um eine hohe Belastbarkeit der Ergebnisse zu garantieren, eine Vielzahl von Gebäuden untersucht werden. Der Aufwand zur Entwicklung und Implementierung von Methoden zur automatisierten Bewertung ist somit vergleichbar. Eine Reduktion des Aufwands zur Datenerhebung ist aufgrund der Verteilung der Gebäude ebenfalls nicht zu erwarten. In Anbetracht der verfügbaren Daten bietet eine Hochrechnung für die anvisierte Potenzialanalyse somit, abseits der Einsparung an Rechenzeit, keine relevanten Vorteile.

Der limitierende Faktor für die Beantwortung der Forschungsfragen stellt somit die Verfügbarkeit von Daten zu relevanten Merkmalen dar. Um auf dieser Basis möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wird eine Vollerhebung relevanter Merkmale zur Potenzialanalyse angestrebt. Zur Speicherung, Verarbeitung und Auswertung der Daten steht hierfür ausreichend Kapazität zur Verfügung.

Im Rahmen dieser Arbeit werden zuerst die relevanten Einflussfaktoren zur Bewertung des technischen Potenzials von Wärmepumpen zur dezentralen Wärmeversorgung identifiziert. Daraufhin wird für die Modellierung der Einflussfaktoren je nach Datenverfügbarkeit folgendermaßen vorgegangen:

1. Sind flächendeckend freie Daten verfügbar, die zur modellhaften Abbildung eines Einflussfaktors geeignet sind, dann werden diese zur Erstellung eines räumlich hochaufgelösten und bundesweiten Modells herangezogen. Der Großteil dieser Daten weist einen Raumbezug auf, weshalb Geoinformationssysteme zum Einsatz kommen. Eine Hochrechnung würde in diesem Fall keine relevanten Vorteile bieten, da ausreichend Rechenleistung vorhanden ist.
2. Wenn Daten nicht flächendeckend frei verfügbar sind, wird dieser Teil der Parameter anhand von Stichproben statistisch analysiert und die resultierenden Werte allen Wohngebäuden anhand von Indikatoren zugewiesen.
3. Ist dies ebenfalls nicht möglich, dann werden ersatzweise recherchierte (Statistik-) Werte oder Annahmen herangezogen.

Um einen Überblick über die Vorgehensweise zu geben, folgt eine Beschreibung des Aufbaus und der Bestandteile der vorliegenden Arbeit (vgl. Abbildung 2-1). Eine detaillierte Beschreibung der Methodik erfolgt in den jeweils genannten Kapiteln. Die Schraffur der Modellabschnitte spiegelt den oben beschriebenen methodischen Ansatz wider. Dabei wird je Einflussfaktor differenziert, ob dieser geometrisch, simulativ, statistisch oder anhand von Recherche bzw. Annahme abgebildet wird.

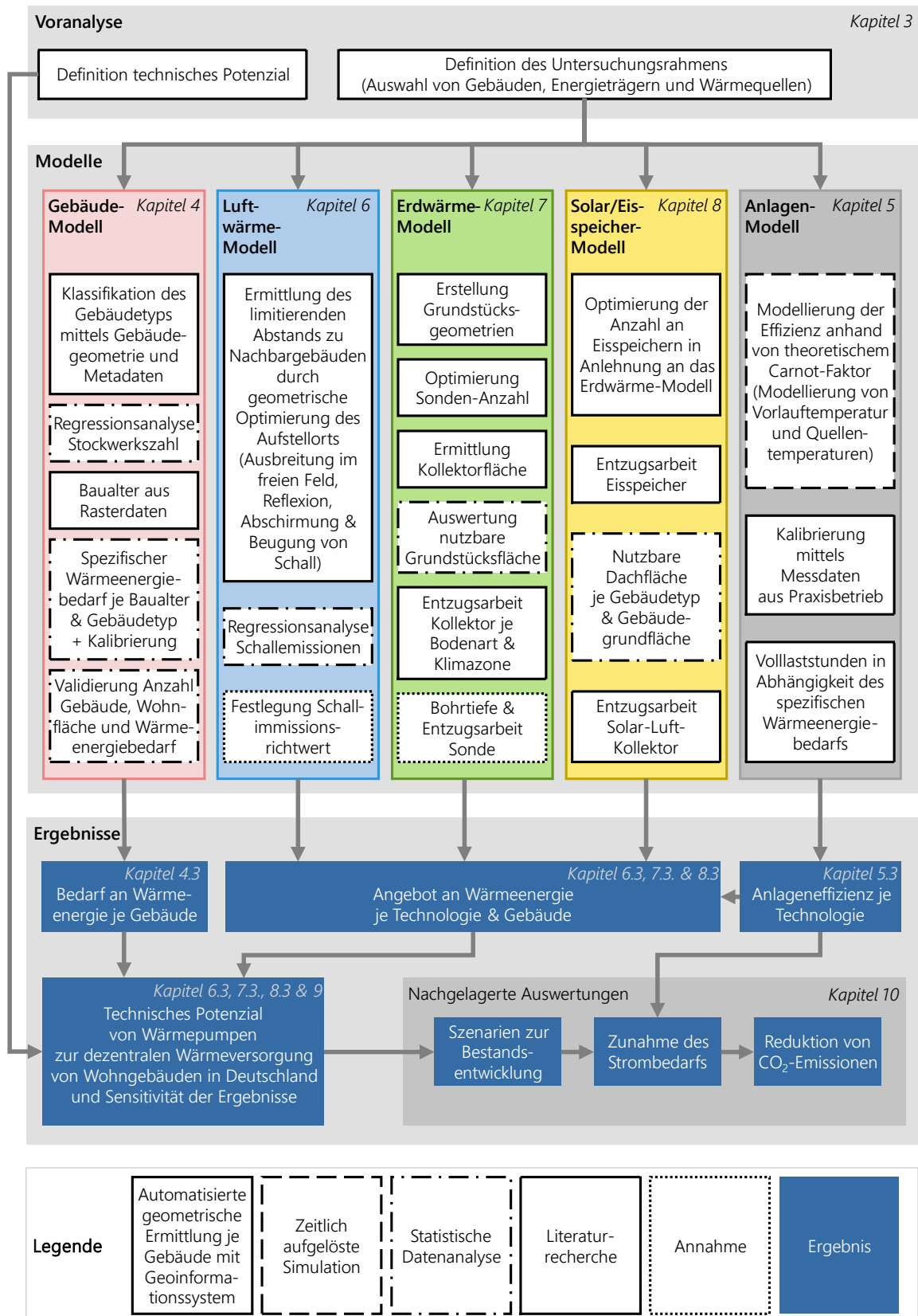


Abbildung 2-1: Methodik-Überblick: Quantifizierung technisches Potenzial von Wärmepumpen



## Voranalyse

In der Voranalyse (Kapitel 3) erfolgen die Einordnung des Begriffs „technisches Potenzial“ sowie die Definition des Untersuchungsrahmens der vorliegenden Arbeit. In Abgrenzung zu [14] und [15] wird das Potenzial im Rahmen dieser Arbeit angegeben als Anteil der Wohngebäude in Deutschland, die mittels Wärmepumpen vollständig mit Wärme versorgt werden können (vgl. Kapitel 3.1). Der Untersuchungsrahmen wird auf die Wärmeversorgung von Wohngebäuden mit elektrischen Wärmepumpen und die Wärmequellen Außenluft, Erdreich und Solarwärme in Kombination mit Eisspeichern festgelegt (vgl. Kapitel 3.2). Die Analyse netzgebundener Versorgungskonzepte ist nicht Teil dieser Arbeit. So wird je Gebäude eine Wärmepumpe analysiert und dies als dezentrale Wärmeversorgung bezeichnet.

## Gebäude-Modell

Um bewerten zu können, ob das Angebot einer Wärmequelle ausreichend ist, um ein Gebäude mittels Wärmepumpe vollständig mit Wärme zu versorgen, werden in Kapitel 4 Methoden entwickelt, die den Wärmeenergiebedarf je Wohngebäude für Deutschland in einem Modell abbilden. Die Grundlage bilden flächendeckend verfügbare Daten mit Raumbezug u. a. Gebäudeumrisse aus OpenStreetMap (OSM) [37], Gebäudehöhen aus amtlichen Quellen (vgl. [38], [39], [40], [41], [42] und [43]) bzw. Satellitendaten [44] und Rasterdaten aus der Zensus-Erhebung [45]. Eine zentrale Rolle im Modell spielt die Klassifikation des Gebäudetyps, da dieser als Merkmal für weitere Einflussfaktoren herangezogen wird. Der Gebäudetyp wird anhand eines mehrstufigen Algorithmus auf Basis von Geometrie- und Metadaten bestimmt. Im ersten Schritt werden Nichtwohngebäude mittels Daten zur Landnutzung und Metadaten aus dem Datensatz gefiltert. Zudem werden Garagen und Nebengebäude anhand ihrer Beschreibung und ihrer Geometrie systematisch identifiziert. Daraufhin werden Wohngebäude in fünf Gebäudetypen differenziert, wobei die Wahl der Klassen in Anlehnung an [46] erfolgt. Gereihete Gebäude weisen spezifische Eigenschaften auf, weshalb diese mithilfe von Regeln klassifiziert werden. Die Unterscheidung freistehender Gebäude hingegen erfolgt auf Basis einer ermittelten Wahrscheinlichkeit zur Klassenzugehörigkeit. Im Anschluss wird anhand der Gebäudehöhe und einer Stichprobe eine Regressionsanalyse durchgeführt, um ein Modell zur Ermittlung der Stockwerkszahl je Gebäudetyp zu erstellen. Mit der Bruttogrundfläche der Gebäude, der Stockwerkszahl und einem Abschlag für die Konstruktions- und Verkehrsflächen wird die Wohnfläche je Gebäude berechnet. Der spezifische Wärmeenergiebedarf je Gebäude basiert auf statistischen Daten und dem Baualter, welches aus Rasterdaten [45] abgeleitet wird. Um eine praxisnahe Verteilung des spezifischen Wärmeenergiebedarfs zu erhalten, wird dieser anhand von statistischen Daten aus Energieverbrauchsausweisen kalibriert. Im Resultat ergibt sich ein Wärmeenergiebedarf je Gebäude. Zur Validierung des Gebäudemodells wird die Anzahl der Gebäude, die Wohnfläche und der Wärmeenergiebedarf mittels Statistiken wie [47] und [48] validiert.

## Anlagen-Modell

Die durch die Wärmepumpe zur Deckung des thermischen Bedarfs benötigte Energie stammt Großteils aus der Wärmequelle und zum Rest aus elektrischer Energie. Um Einflüsse, wie das regionale Klima, zu berücksichtigen, erfolgt in Kapitel 5 die modellhafte Abbildung der Effizienz der untersuchten Wärmepumpen. Dies erfolgt auf Basis des theoretischen Carnot-Faktors unter Berücksichtigung der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und -senke in stündlicher Auflösung und anschließender Kalibrierung mit Messdaten aus der Praxis. Zudem wird die Höhe der Volllaststunden der Anlagen ermittelt. Diese Größen werden für die Bestimmung des Potenzials in den Kapiteln 6, 7 und 8 sowie für die Ausweisung des Strombedarfs in Kapitel 10.3 herangezogen.

### **Luftwärme-Modell**

Das Potenzial von Luftwärmepumpen (vgl. Kapitel 6) ist nicht durch die Ergiebigkeit der Wärmequelle, sondern durch die Anforderungen an den Schallschutz limitiert. Denn unabhängig davon, ob die Luft-Wasser-Wärmepumpe in Innen-, Außen- oder Split-Aufstellung platziert ist, werden durch die Bewegung von Luft Schallemissionen verursacht. Die Höhe der Schallimmission, die am Nachbargebäude messbar sein darf, ist in [49] gesetzlich geregelt. Deshalb werden im Luftwärme-Modell Methoden entwickelt, um die Einsatzmöglichkeiten von Luftwärmepumpen anhand räumlicher Analysen automatisiert für alle Wohngebäude quantifizieren zu können. Zu diesem Zweck werden auf Basis zweidimensionaler Geometriedaten [37] mögliche Anlagenstandorte sowie deren Abstände zu Nachbargebäuden untersucht. Dabei werden rund um die Gebäudepolygone mehrere Punkte als potenzielle Aufstellorte analysiert. Zur Laufzeitoptimierung richtet sich die Anzahl der Punkte nach dem Umfang der Gebäude. Neben der Ausbreitung im freien Feld werden die Reflexion, die Abschirmung und die Beugung von Schall berücksichtigt. Hierfür wird auf Basis einer Geodatenbank (PostgreSQL mit PostGIS-Erweiterung) ein laufzeitoptimierter Algorithmus entwickelt, sodass die Nachbarschaftsanalyse für jedes der Wohngebäude automatisiert durchgeführt werden kann. Um die Höhe der Schallemissionen in von am Markt befindlichen Luftwärmepumpen in Abhängigkeit der Heizleistung im Modell abzubilden, wird auf Basis von Herstellerdaten eine Regressionsanalyse durchgeführt. Mit der Formel zur Schallausbreitung nach [50] und einem konservativ angesetzten Richtwert für Schallimmissionen wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen Abstand von Emissions- zu Immissionsort und installierbarer Heizleistung hergestellt. In Kombination mit dem in der Nachbarschaftsanalyse ermittelten Abstand je Gebäude werden die maximal mögliche Heizleistung der Luftwärmepumpe und mittels der Volllaststunden aus dem Anlagen-Modell das Wärmeenergieangebot berechnet. Durch den Vergleich von Angebot und Bedarf an Wärmeenergie je Gebäude wird das Potenzial ermittelt. In der anschließenden Sensitivitätsanalyse wird u. a. untersucht, welche Auswirkungen die Wahl des Aufstellorts, die Höhe der Schallemissionen sowie eine Reduktion des Wärmeenergiebedarfs auf die Höhe des Potenzials haben.

### **Erdwärme-Modell**

Um das Potenzial von Erdwärmepumpen flächendeckend zu quantifizieren, wird eine Methodik für die automatisierte Bewertung der Verfügbarkeit, Nutzbarkeit und Ergiebigkeit von Grundstücksflächen entwickelt (Kapitel 7). Für die automatisierte Analyse räumlicher Daten nutzt der implementierte Algorithmus Funktionen eines Geoinformationssystems. Zur Erschließung von Erdwärme werden sowohl Erdsonden als auch Erdkollektoren (Horizontalkollektor, Kapillarrohrmatte, Erdwärmekorb und Spiralkollektor) untersucht. Das entwickelte Modell erstellt auf Basis der Daten aus [37] Grundstücksgeometrien. Weiter werden mit dem Algorithmus die, je nach Art der Erschließung, einzuhaltenden Abstände zu Gebäuden und zu Grundstücksgrenzen geometrisch berücksichtigt. So wird die für Erdkollektoren maximal verfügbare Fläche bestimmt. Zudem wird je Grundstück die maximale Anzahl an Erdsonden, Spiralkollektoren und Erdwärmekörben durch die iterative Verschiebung eines Gitters von Punkten je Grundstück geometrisch optimiert. Darüber hinaus werden Wasserschutzgebiete und Gebiete mit Vorkommen von Gips oder Anhydrid geometrisch mit den Gebäuden verschnitten und als Ausschlusskriterien berücksichtigt. Als ökologische Einschränkung des Erdwärme-Potenzials wird die Nutzungskonkurrenz auf der Grundstücksfläche, wie bestehende Bäume, mithilfe einer manuell ausgewerteten Stichprobe analysiert. Mit der Entzugsarbeit kann das Angebot der Wärmequelle bestimmt werden. Diese basiert für Erdkollektoren auf Daten zur Bodenart und Klimazone je Gebäude sowie Werten aus der Norm VDI 4640. Für Erdsonden werden Annahmen bezüglich der Entzugsarbeit getroffen und statistische Daten für die Bohrtiefe herangezogen. Unter Einbezug der Effizienz von Erdwärmepumpen aus Kapitel 5 wird das Angebot an

Wärmeenergie je Grundstück bzw. Gebäude ermittelt. Durch den Vergleich mit dem Wärmeenergiebedarf je Gebäude wird das Potenzial von Erdwärmepumpen quantifiziert. In der darauffolgenden Sensitivitätsanalyse wird das Angebot und der Bedarf an Wärmeenergie gegenübergestellt. So kann der Einfluss von Parametervariationen auf das Ergebnis bewertet werden.

### **Solar/Eisspeicher-Modell**

Die Kombination aus Solar-Luft-Kollektor und Eisspeicher ist ebenfalls für den flächendeckenden Einsatz in Kombination mit Wärmepumpen geeignet und wird deshalb in Kapitel 8 untersucht. Als Eignungskriterien werden im Modell die nutzbare Dachfläche und die verfügbare Grundstücksfläche für Eisspeicher automatisiert bewertet. Die geometrische Ermittlung der Eisspeichergroße erfolgt in Anlehnung an die Methodik zur Bestimmung der maximalen Anzahl an Erdsonden. Analog zur Vorgehensweise des Erdwärme-Modells werden Abstände zur Grundstücksgrenze bzw. zu Gebäuden sowie der nutzbare Anteil der Grundstücksfläche berücksichtigt. Die Dachfläche wird anhand einer umfassenden Stichprobe eines Solardachkatasters [51] statistisch ausgewertet und in Abhängigkeit der Gebäudegrundfläche und des Gebäudetyps auf alle analysierten Gebäude übertragen. Die mittels Herstellerangaben abgebildete Entzugsarbeit ermöglicht die Berechnung des Wärmeenergieangebots. Dieses ermöglicht die Ermittlung des Potenzials. Darüber hinaus wird auch hier eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss einer systemischen Unter- oder Überschätzung von Eingangsparametern zu untersuchen.

### **Ergebnisinterpretation**

Durch den Vergleich von Angebot und Bedarf an Wärmeenergie je Gebäude wird die Eignung der Technologien bestimmt. Der Anteil der als geeignet eingestuften Gebäude in Deutschland entspricht dem technischen Potenzial je Wärmequelle. Systemische Analysen dieses Potenzials sind stets mit Unsicherheit behaftet. Deshalb wird je Technologie der Einfluss von Parametervariationen auf das Ergebnis anhand Sensitivitätsanalysen untersucht. Darüber hinaus wird diskutiert, wie sich das Potenzial durch die Veränderung des Gebäudebestands oder Technologieentwicklungen künftig verändern kann. Weiter wird das gemeinsame Potenzial für alle analysierten Wärmequellen (Kapitel 9) erläutert. In Kapitel 10 wird untersucht, welche Auswirkungen das ermittelte Potenzial auf die Bestandsentwicklung bzw. die Technologiezusammensetzung und somit auf den zukünftigen Strombedarf bzw. Beitrag zur Treibhausgasreduktion haben kann.

Auch wenn möglichst alle Gebäude anhand von Modellen untersucht werden sollen, ist es nicht das Ziel der Analysen eine abschließende Bewertung der Möglichkeiten einzelner Gebäude durchzuführen. Hierzu wäre eine Einzelfallprüfung auf Basis aller Gegebenheiten vor Ort notwendig, da relevante Größen wie der individuelle Sanierungsstand des Gebäudes und die Systeme der Wärmeverteilung und -übergabe nicht anhand frei verfügbarer Daten in Modellen abbildbar sind. Vielmehr soll durch die Modelle die Heterogenität des Gebäudebestands abgebildet werden, wofür auch statistische Daten herangezogen werden. Hierbei ist es nicht möglich, dass die Zuordnung der Werte zu den einzelnen Gebäuden in jedem Fall korrekt erfolgt. Um dem Einfluss möglicher systemischer Fehler Rechnung zu tragen, wird je Technologie eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

### **Einordnung in den Projektkontext**

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Projekts „Wärmepumpenpotenzial in Deutschland“ an der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (FfE München)<sup>1</sup>. In diesem Projekt entstand ebenfalls die Webvisualisierung „Wärmepumpen-Ampel“ (vgl. [52]), die auf den in dieser Arbeit entwickelten Modellen basiert. Die abweichende Zielsetzung führt dabei zu methodischen Unterschieden. Um die heterogene Struktur des Gebäudebestands abzubilden, werden im Rahmen dieser Arbeit alle Parameterausprägungen, die anhand von statistischen Verteilungsfunktionen abgebildet werden auf verschiedene Gebäude verteilt. In [52] hingegen werden Aussagen zu Einzelgebäuden getroffen, weshalb die Verteilungsfunktionen hier als Wahrscheinlichkeit je Gebäude ausgewertet werden.

---

<sup>1</sup> Teilergebnisse der vorliegenden Arbeit (das technische Potenzial von Wärmepumpen zur Wärmeversorgung der Bestandsgebäude in Deutschland je Wärmequelle und gesamt) wurden im Rahmen einer Pressemitteilung mit dem Titel „Grünes Licht für Wärmepumpen: „Wärmepumpen-Ampel“ zeigt Potenziale für Wohngebäude in Deutschland“ am 27.9.2022 veröffentlicht.

## 3 Voranalyse

Die Möglichkeiten zur Wärmeversorgung von Gebäuden mit Wärmepumpen sind vielfältig. Deshalb wird in diesem Kapitel der Untersuchungsrahmen spezifiziert. Der Begriff „Potenzial“ ist in diesem Kontext nicht allgemeingültig definiert, weshalb zuerst beschrieben wird, wie dieser im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird. Daraufhin wird definiert welche Gebäude und welche Art der Wärmeversorgung untersucht werden, um einen flächendeckenden Einsatz von Wärmepumpen erreichen zu können. Weiter wird ein Energieträger für den Antrieb der Wärmepumpe ausgewählt, der zur Erreichung der Klimaziele geeignet ist. Im letzten Schritt werden die zu untersuchenden Wärmequellen ausgewählt. Hierzu müssen die Wärmequellen flächendeckend verfügbar, für die alleinige Wärmeversorgung ergiebig genug und mit einer Technologie nutzbar sein, die mit dem Verteilungssystem der ausgewählten Gebäude kompatibel ist.

### 3.1 Definition technisches Potenzial

---

Allgemein beschreibt der Begriff Potenzial die „Gesamtheit aller vorhandenen, verfügbaren Mittel, Möglichkeiten, Fähigkeiten, Energien“ [53]. Dieser Ausdruck findet in verschiedenen Gebieten wie der Physik, der Flexibilisierung elektrischer Last (vgl. [54]) u. v. m. Anwendung. Für die Ausweisung von technischen Potenzialen für Wärmequellen von Wärmepumpen liegt keine standardisierte Definition vor (vgl. [15], [55], [56]), weshalb in diesem Kapitel konkretisiert wird, wie der Begriff im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird.

Nach [56] lässt sich das Potenzial zum Einsatz von Technologien differenzieren in:

- **Theoretisches Potenzial:** maximal mögliche Umsetzung einer Technologie, die sich aus dem gesamten Angebot bzw. der gesamten Nachfrage ergibt, einschließlich künftiger zu erwartender neuer Techniken
- **Technisches Potenzial:** theoretisches Potenzial unter Berücksichtigung technischer, infrastruktureller und ökologischer Einschränkungen sowie zeitlicher und räumlicher Diskrepanzen von Angebot und Nachfrage
- **Wirtschaftliches Potenzial:** Anteil des technischen Potenzials, der – ggf. unter Einbezug von Förderungen – aus volkswirtschaftlicher oder betriebswirtschaftlicher Sicht nutzbar ist
- **Umsetzbares Potenzial:** Teil des wirtschaftlichen Potenzials, der unter den gegebenen Randbedingungen z. B. rechtliche und administrative Hemmnisse, begrenzte Verfügbarkeiten von Investitionsmitteln und mangelnde Informationen realisiert werden kann

Ziel dieser Arbeit ist es, ein oberes Limit (Potenzialgrenze) für die Anzahl von Wärmepumpen in Energiesystemszenarien zu ermitteln. Die Modellierung technischer und ökologischer Limitierungen ist der Kern der Untersuchungen dieser Arbeit. Beispielsweise wird nicht nur die gesamte Grundstücksfläche, sondern auch die Verwendbarkeit für Erdwärme, also die Einschränkung durch konkurrierende Nutzungen wie bestehende Bäume, analysiert. Nach [55] sind für das technische Potenzial auch gesetzliche Vorgaben zu beachten. Demnach ist für die Quantifizierung des technischen

Potenzials von Luftwärmepumpen die Einhaltung von Schallimmissionsrichtwerten nach [49] zu berücksichtigen.

Die Wirtschaftlichkeit ist nicht Teil der Bewertung, da diese kontinuierlichen Preisveränderungen unterliegt, stark durch staatliche Förderungen und Subventionen beeinflusst und in Energiesystemmodellen meist endogen ermittelt wird. Limitierungen durch Faktoren wie die Verfügbarkeit von Investitionsmitteln, Fachpersonal oder Informationen werden ebenfalls nicht einbezogen, da diese im Rahmen dieser Untersuchung nicht quantifizierbar sind.

Abschließend kann festgehalten werden, dass diese Arbeit ausschließlich das technische Potenzial von Wärmepumpen untersucht. Dieses entspricht der maximal möglichen Umsetzung der Technologie, welches sich aus dem gesamten Angebot bzw. der gesamten Nachfrage unter Berücksichtigung technischer, infrastruktureller und ökologischer Einschränkungen sowie zeitlicher und räumlicher Diskrepanzen von Angebot und Nachfrage ergibt [56]. Es wird nachfolgend Potenzial genannt und angegeben als Anteil der Wohngebäude in Deutschland, die mittels Wärmepumpen vollständig mit Wärme versorgt werden können (vgl. Formel (3-1)).

$$Potenzial_w = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{n}, \text{ wobei } G_i = 1 \text{ für alle Gebäude mit } Q_{i,w}^{Angebot} \geq Q_i^{Bedarf} \quad (3-1)$$

$$G_i = 0 \text{ für alle Gebäude mit } Q_{i,w}^{Angebot} < Q_i^{Bedarf}$$

$w$	Index der untersuchten Wärmequelle
$i$	Index der untersuchten Gebäude
$n$	Anzahl der untersuchten Gebäude
$Q$	Wärmeenergie

Die Potenzialanalyse wird auf Basis des heutigen Gebäudebestands durchgeführt. In der Potenzialanalyse wird zudem aufgezeigt, wie sich das Potenzial gegenüber systemischen Veränderungen des Angebots oder Bedarfs an Wärmeenergie verhält. So können auch die Auswirkungen struktureller Veränderungen wie die einer tiefgreifenden Dämmung des Gebäudebestands eingeordnet werden. Die Angabe des Potenzials als Anteil der versorgbaren Gebäude ermöglicht den direkten Vergleich mit anvisierten Mantelzahlen in Szenarien zur Bestandsentwicklung. Zur weiteren Ergebnisinterpretation wird auch der mittels Wärmepumpen bereitstellbare Wärmeenergiebedarf berechnet. In Abgrenzung zu [15] bzw. [14] enthält diese Angabe keine Energiemengen von Gebäuden, welche nur anteilig mit einer Wärmepumpe versorgt werden können.

Als weitere Auswertung wird in Kapitel 9 das Potenzial bestimmt, dass dem Anteil der Wohngebäude entspricht, die mindestens mit einer der analysierten Wärmequellen vollständig mit Wärme versorgt werden können. Auch in diesem Fall wird der zugehörige Wärmeenergiebedarf ausgewiesen.

## 3.2 Definition des Untersuchungsrahmens

---

Im Folgenden wird der Untersuchungsrahmen dieser Arbeit definiert. Dies beinhaltet eine Konkretisierung der untersuchten Gebäude, der Art der Wärmeversorgung, des Energieträgers und der zu analysierenden Wärmequellen. Die Beschreibung der ausgewerteten Einflussfaktoren hingegen erfolgt in den Methodik-Kapiteln der einzelnen Modelle (vgl. Kapitel 4.2, 5.2, 6.2, 7.2 und 8.2).

### 3.2.1 Untersuchte Gebäude

---

Nachfolgend wird erläutert auf welchen Teil des heterogenen Gebäudebestands in Deutschland sich die vorliegende Arbeit bezieht. Denn die Anforderungen an die Wärmeversorgung von Gebäuden

hängen maßgeblich von deren Nutzung ab. In Deutschland gibt es rund 40,4 Mio. Gebäude, wovon etwa 19,3 Mio. Wohngebäude [12] und 21,1 Mio. Nichtwohngebäude [13] sind (Stand: 2020). Von den Nichtwohngebäuden werden circa 2,0 Mio. beheizt bzw. gekühlt [13]. Die Anforderungen an die Wärme- bzw. Kälteversorgung von Nicht-Wohngebäuden sind sehr heterogen [57]. Darüber hinaus ist die Menge an frei verfügbaren Daten hierfür nicht ausreichend, um im Rahmen dieses Vorhabens flächendeckende Analysen durchzuführen. Die Nutzung von Wohngebäuden hingegen variiert weniger stark. Zudem sind hier flächendeckende Geodaten zu relevanten Parametern wie Grundriss (vgl. [37]), Höhe (vgl. [38], [39], [40], [41], [42] [43] und [44]) und Baualter (vgl. [45]) der Gebäude vorhanden.

Bis zum Jahr 2019 wurden mehr Wärmepumpen im Neubau als in Bestandsgebäuden installiert [58]. Der Großteil der Emissionen entsteht hingegen in Bestandsgebäuden, welche vor 1995 gebaut wurden [59]. Zum einen ist in diesen Gebäuden aufgrund der geringeren energetischen Qualität der Gebäudehülle der Wärmeenergiebedarf deutlich höher und zum anderen ist die Anzahl dieser Gebäude deutlich höher als die von Gebäuden mit jüngerem Baualter [59].

Entgegen dem Vorurteil, dass eine Beheizung von Bestandsgebäuden mit Wärmepumpen nicht zielführend ist, existieren bewährte technische Lösungen, um auch in diesen Gebäuden einen effizienten Betrieb zu ermöglichen. So kann die Reduktion der Vorlauftemperatur i. d. R. mit vergleichsweise geringem Aufwand, wie dem Austausch von Heizkörpern durch größere oder den Einsatz von Niedertemperaturheizkörpern erreicht werden (vgl. [4] und [60]).

In dieser Arbeit werden ausschließlich Wohngebäude betrachtet, wobei der Fokus in der Modellierung auf Bestandsgebäuden liegt, deren Wärmeversorgung eine außerordentliche Relevanz für die Energiewende darstellt.

### **3.2.2 Art der Wärmeversorgung**

---

Nach der Festlegung, aufgrund der Relevanz und der Verfügbarkeit freier Daten ausschließlich Wohngebäude zu analysieren, wird die Art der Wärmeversorgung in diesem Abschnitt konkretisiert. Alle netzgebundenen Versorgungskonzepte, wie Nah- und Fernwärme, werden als zentrale Wärmeversorgung bezeichnet. In Abgrenzung dazu wird die Wärmeversorgung als dezentral bezeichnet, wenn Gebäude mit einem eigenständigen Heizsystem versorgt werden. Auch Wärmepumpen können sowohl dezentral als auch zentral eingesetzt werden.

In Deutschland werden derzeit 94,6 % der Wohngebäude bzw. 87,8 % der Wohnungen nicht zentral mit Wärme versorgt (Stand 2020 nach [59] auf Basis von [61], wobei auch Blockheizungen hier als dezentral gewertet wurden). Im Zuge der Energiewende müssen diese v. a. mit Erdgas und Heizöl betriebenen dezentralen Heizsysteme auf erneuerbare Energien umgestellt werden. Dies kann unter Beibehaltung der dezentralen Strukturen oder durch Ausbau von Wärmenetzen (zentral) erfolgen.

Treiber zum Ausbau zentraler Systeme sind u. a. ein geringer Platzbedarf im bzw. am Gebäude, die Möglichkeit zur Nutzung von Wärmequellen wie tiefe Geothermie und Abwärme und die Möglichkeit zur hybriden Wärmebereitstellung (Flexibilität). Die Vorteile der zentralen Versorgung kommen v. a. in Gebieten mit hoher Wärmebedarfsdichte zum Tragen. Da es sich bei der Verlegung von Wärmenetzen in bestehenden Strukturen i. d. R. um aufwendige Infrastrukturprojekte handelt, sind sprunghafte Verschiebungen zwischen dezentraler und zentraler Wärmeversorgung nicht zu erwarten. Ein Vorteil dezentraler Wärmepumpen gegenüber zentralen Wärmepumpen ist, dass sie individuell an die Rahmenbedingungen (u. a. Vorlauftemperatur) der einzelnen Gebäude angepasst werden können.

Der dezentrale und zentrale Einsatz von Wärmepumpen unterscheidet sich in vielerlei Hinsicht, unter anderem, in Bezug auf die eingesetzten Wärmequellen. Deshalb werden im Rahmen dieser Arbeit, ausgehend von der aktuell dezentral dominierten Beheizungsstruktur, ausschließlich die Möglichkeiten der dezentralen Wärmeversorgung mit Wärmepumpen analysiert. Dabei wird davon ausgegangen, dass jeweils eine Wärmepumpe ein Gebäude vollständig mit Raumwärme und Trinkwarmwasser versorgt. Nicht analysiert werden demnach: Trinkwarmwasser-Wärmepumpen, hybride Systeme wie z. B. die Kombination aus Wärmepumpe und Heizkessel.

### 3.2.3 Auswahl des Energieträgers

Nachdem der Untersuchungsrahmen auf Wohngebäude und dezentrale Wärmepumpen eingegrenzt wurde, folgt die Auswahl des Energieträgers. Wärmepumpen können mit Strom oder Erdgas betrieben werden. Ziel ist es, Energieträger zu analysieren, die mit dem definierten Ambitionsniveau der Klimaschutzziele – einer nahezu vollständigen Dekarbonisierung des Gebäudebestands bis 2050 (siehe [2]) vereinbar sind.

Abbildung 3-1 zeigt die Entwicklung der Emissionsfaktoren für Strom und Erdgas für das Business-As-Usual (BAU)-Szenario und das Klimaschuttszenario (Technologiemix) nach [62].

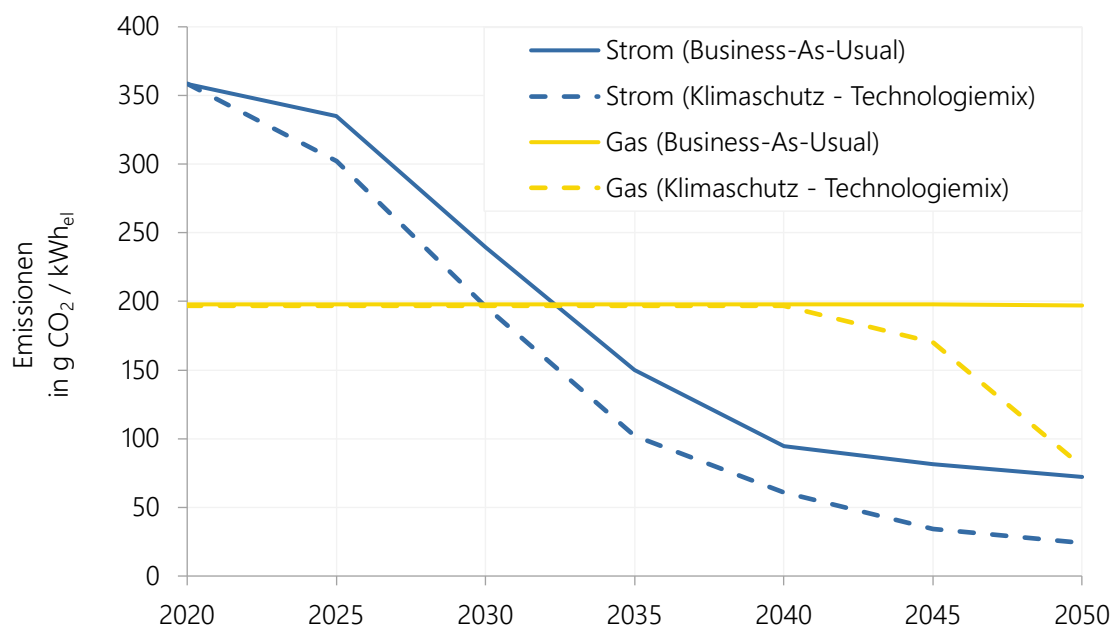


Abbildung 3-1: CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für Strom und Gas im Zeitraum 2020-2050 [62]

Während der Emissionsfaktor für Erdgas im BAU-Szenario unverändert bei 200 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>el</sub> liegt, nimmt der Emissionsfaktor von Strom unter Annahme eines weiteren Ausbaus erneuerbarer Energien ab. Im Klimaschuttszenario nimmt auch der Emissionsfaktor für Erdgas ab, da hier das Ziel eine vollständige Dekarbonisierung der gesamten Energieversorgung ist. Durch Beimischung von Wasserstoff und Biomassevergasung erfolgt eine Reduktion des Emissionsfaktors von Erdgas in den Jahren 2040 bis 2050.

Neben dem Emissionsfaktor spielt auch die Effizienz der Wärmepumpe eine wichtige Rolle bei der Auswahl des Energieträgers. Die Jahresarbeitszahl zur Wärmeversorgung von Bestandsgebäuden



liegt für Gaswärmepumpen im Bereich von 1,2 bis 1,5 (vgl. [63] und [64]) und für Elektrowärmepumpen zwischen 2,5 und 4,7 (vgl. [65]). Diese Minimal- und Maximalwerte basieren auf einer Recherche zu Feld- und Simulationsstudien und sind nicht nach Wärmequellen differenziert.

Die Kombination aus dem Emissionsfaktor des Energieträgers und der Jahresarbeitszahl der Technologie ergibt die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Diese sind in Abbildung 3-2 als Bereich zwischen Worst- und Best-Case je Technologie dargestellt. Die obere Grenze entspricht jeweils dem Emissionsfaktor des BAU-Szenarios in Kombination mit der minimalen Jahresarbeitszahl. Die untere Grenze entspricht dem Emissionsfaktor im Klimaschutzszenario und der maximalen Jahresarbeitszahl.

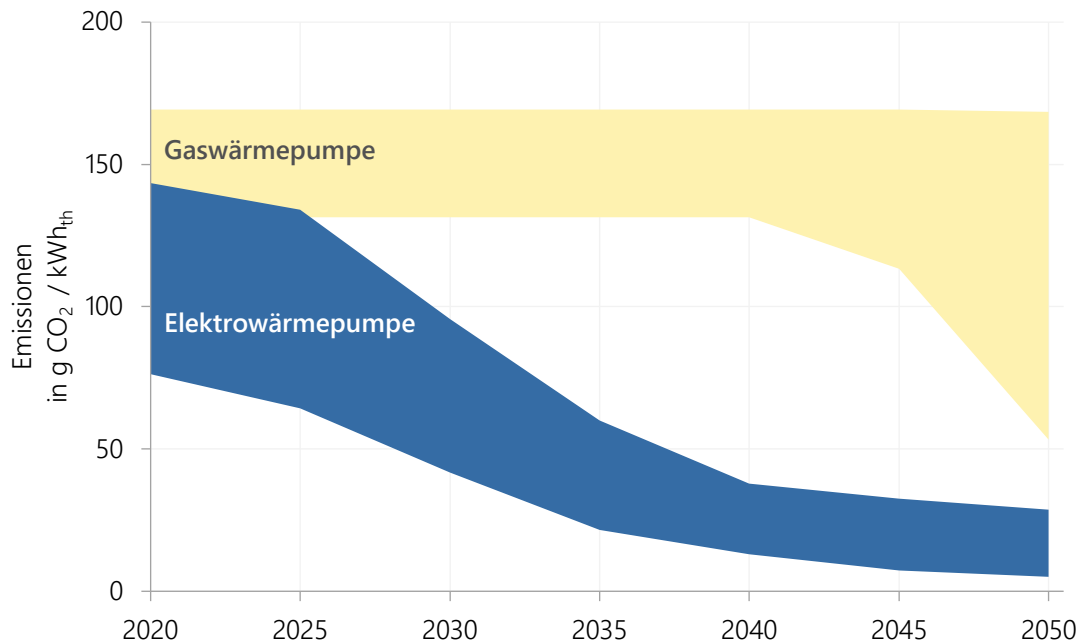


Abbildung 3-2: Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen für Gas- und Elektrowärmepumpen 2020 bis 2050

Abbildung 3-2 zeigt die Entwicklung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen von Gas- und Elektrowärmepumpen je bereitgestellter Kilowattstunde Wärme unter den beschriebenen Prämissen. Derzeit ist die Höhe der spezifischen Emissionen effizienter Gaswärmepumpen mit denen von ineffizienten Elektrowärmepumpen vergleichbar. Dies verändert sich über die Jahre deutlich. Die Emissionen, welche durch die Stromerzeugung verursacht werden, nehmen deutlich ab. Dies liegt ausschließlich am Emissionsfaktor von Strom, da eine Erhöhung der Effizienz durch Technologieentwicklung für die Voranalyse nicht berücksichtigt wurde. Der Emissionsfaktor für Erdgas hingegen stagniert bis zum Jahr 2040 und erreicht auch im Klimaschutzszenario nicht die geringen Werte des Emissionsfaktors von Strom.

Auf Basis der beschriebenen Annahmen lässt sich schlussfolgern, dass aus Sicht des Klimaschutzes der flächendeckende Einsatz von Elektrowärmepumpen zielführender als der von Gaswärmepumpen ist. Aus diesem Grund beziehen sich alle folgenden Analysen und Nennungen des Begriffs Wärmepumpe ausschließlich auf Elektrowärmepumpen.

Nicht zuletzt durch die geopolitisch angespannte Lage seit Frühjahr 2022 wurden in [66] die Pläne zum Ausbau erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung noch ambitionierter gesteckt. Dies hat auch Veränderungen der in diesem Abschnitt dargestellten Szenarien zur Folge. Demgegenüber ändert sich das daraus gezogene Fazit nicht.

### 3.2.4 Auswahl der Wärmequellen

Nach der Spezifizierung des Untersuchungsrahmens auf dezentrale Elektrowärmepumpen für die Wärmeversorgung von Wohngebäuden werden im Folgenden die zu untersuchenden Wärmequellen selektiert. Um die für die Energiewende relevantesten Wärmequellen zu berücksichtigen, werden diejenigen ausgewählt, die flächendeckend verfügbar, ergiebig und mit der Wärmeverteilung in Bestandsgebäuden kompatibel sind. In Tabelle 3-1 sind diese Auswahlkriterien näher erläutert.

Tabelle 3-1: Kriterien zur Auswahl der zu untersuchenden Wärmequellen

Auswahlkriterium	Beschreibung
Flächendeckende Verfügbarkeit	Dieses Kriterium dient zur Abschätzung, ob ein flächendeckender Einsatz der Technologie potenziell möglich ist. Wärmequellen, die nur in der Nähe einer begrenzten Anzahl von Gebäuden verfügbar sind, werden aufgrund dieses Kriteriums von den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen.
Ergiebigkeit	Die Ergiebigkeit beschreibt, ob die der Wärmequelle entziehbare Energie ausreicht, um den Wärmeenergiebedarf von Wohngebäuden potenziell zu decken. Sie wird in der Voranalyse qualitativ bewertet.
Kompatibilität mit Bestandsgebäuden	Der Fokus der Untersuchungen liegt auf Bestandsgebäuden, weshalb ein weiteres Auswahlkriterium die Kompatibilität mit dem i. d. R. bestehenden Wärmeverteilsystem ist. In Deutschland ist Wasser als Wärmeträgermedium im Verteilsystem des Gebäudes üblich [67], weshalb Technologien mit Luft als Medium zur Wärmeverteilung im Gebäude nicht weiter analysiert werden.

Die Prüfung dieser Kriterien erfolgt auf Basis einer Literaturrecherche. Folgende Wärmequellen wurden dabei überprüft:

- Außenluft
- Erdreich
- Solarwärme
- Grundwasser
- Abwasser
- Oberflächenwasser
- Gewerbliche Abwärme

Nachfolgend wird die Auswahl der Wärmequellen beschrieben. Für Wärmequellen, welche die definierten Kriterien (vgl. Tabelle 3-1) erfüllen, werden die grundlegenden Eignungskriterien aufgeführt und die hierfür mögliche Verwendung frei verfügbarer Daten überprüft. Eine detaillierte Beschreibung und die quantitative Bewertung der Eignungskriterien erfolgt in den entsprechenden Kapiteln der analysierten Wärmequellen (vgl. Kapitel 6.2.1, 7.2.1 und 8.2.1).

#### Außenluft

Außenluft als Wärmequelle zeichnet sich dadurch aus, dass sie an jedem Wohngebäude verfügbar ist und demnach für einen flächendeckenden Einsatz in Frage kommt [67].

Luftwärmepumpen sind trotz der ausgeprägten saisonalen Schwankung der Außenlufttemperatur und damit ihrer Effizienz (vgl. Kapitel 5) in der Lage als alleiniger Wärmeerzeuger die Heizlast von Wohngebäuden bereitzustellen [67]. Um die thermische Spitzenlast im Winter abzudecken, werden aus Gründen der Wirtschaftlichkeit i. d. R. zusätzliche Wärmeerzeuger wie elektrische Heizstäbe eingesetzt. Aufgrund der geringen spezifischen Wärmekapazität von Luft ist ein hoher Volumenstrom und ein Wärmetauscher mit großer Oberfläche notwendig [68]. Lokal führt der Wärmeentzug zu einer Abkühlung der Außenluft. Ob sich Luftwärmepumpen dadurch gegenseitig negativ beeinflussen und die Ergiebigkeit der Quelle limitiert ist, wurde bisher noch nicht umfassend untersucht [69]. Selbst wenn dies messbare Auswirkungen auf die Effizienz hätte, stellt dies aufgrund der ständigen Durchmischung der Außenluft keine grundsätzliche Einschränkung dar (vgl. [68]).

Der hohe Volumenstrom der Luft verursacht Schallemissionen, die sich in der direkten Umgebung ausbreiten und deren Immission durch einzuhaltende Richtwerte reglementiert ist. Für die Bewertung der Eignung von Außenluft als Wärmequelle ist deshalb die Einhaltung der Anforderungen des Schallschutzes zu untersuchen. Zu diesem Zweck sind geometrische Informationen zur Lage von Gebäuden und Nachbargebäuden erforderlich. Hierfür sind frei erhältliche Daten verfügbar.

Aufgrund ihrer hohen Verfügbarkeit, Ergiebigkeit und der Datenverfügbarkeit wird Außenluft als Wärmequelle näher analysiert (vgl. Kapitel 5). In Deutschland kommt überwiegend Wasser als Medium zur Wärmeverteilung in Wohngebäuden zum Einsatz, weshalb ausschließlich Luft-Wasser-Wärmepumpen untersucht und im Rahmen dieser Arbeit als Luftwärmepumpen bezeichnet werden.

### **Erdreich**

Erdwärme ist grundsätzlich in der Umgebung jedes Wohngebäudes verfügbar.

Die Ergiebigkeit dieser Wärmequelle hängt von der verfügbaren Grundstücksfläche und der möglichen Entzugsarbeit im Untergrund ab. Zur Erschließung dieser Wärmequelle existieren verschiedene Technologien, die im Erdreich in bis zu etwa 400 m Tiefe eingebracht werden. Mit der Tiefe nimmt auch die Temperatur des Erdreichs zu (ca. 3 °C pro 100 m), da die Erdkruste im Vergleich zum Erdmittelpunkt eine geringere Temperatur aufweist und deshalb ein stetiger Wärmestrom in Richtung Erdoberfläche zu verzeichnen ist. [70]

Die benötigte Grundstücksfläche sowie die Eigenschaften im Untergrund sind kein Ausschlusskriterium zur Untersuchung von Erdwärme, da davon ausgegangen wird, dass die für die Wärmeversorgung benötigte Fläche vielfach kleiner als die typische Grundstücksfläche ist. Das Erdreich als Wärmequelle wird im Rahmen dieser Arbeit weiter untersucht (vgl. Kapitel 7), da es die genannten Kriterien erfüllt und anhand frei verfügbarer Daten analysiert werden kann.

### **Solarwärme**

Die Sonne erwärmt die Außenluft sowie das Erdreich und steht somit in Zusammenhang mit den zuvor genannten Wärmequellen. Anhand von Solarkollektoren kann sie auch direkt in Kombination mit Wärmepumpen genutzt werden. Solarwärme ist abgesehen von tages- und jahreszeitlichen Schwankungen in Deutschland flächendeckend nutzbar.

Die jährliche Globalstrahlung beträgt im Mittel 950 bis 1.200 kWh/m<sup>2</sup> [71]. Für die qualitative Einordnung der Ergiebigkeit als Primärquelle für Wärmepumpen ist nicht diese Energiemenge, sondern der zum Wärmebedarf antizyklische saisonale Verlauf zu berücksichtigen. An strahlungsarmen Wintertagen reicht der solare Ertrag allein nicht aus. Aus diesem Grund werden in Kombination mit Wärmepumpen bevorzugt unverglaste Kollektoren – auch Absorber genannt – verwendet, die neben Diffusstrahlung gezielt auch Wärme aus der Außenluft aufnehmen können [72]. Deshalb werden diese auch Solar-Luft-Kollektoren genannt. Für die Überbrückung von Phasen mit sehr

geringen Außentemperaturen wird zudem ein Wärmespeicher für die Energie aus dem Solar-Luft-Kollektor benötigt. Bei geringem bis moderatem spezifischem Wärmeenergiebedarf kann hierfür ein sehr großer Wasserspeicher im Heizungsraum ausreichen (vgl. [72]). Für viele Bestandsgebäude hingegen empfiehlt sich ein sogenannter Eisspeicher mit dem auch die latente Wärme im Phasenübergang von flüssig zu fest genutzt werden kann [60]. Eisspeicher werden i. d. R. als zylindrische, mehrere Meter große und mit Wasser gefüllte Behälter unterirdisch im Außenbereich installiert und zur Regeneration durch Erdwärme nicht gedämmt.

Die Wärmequelle Sonne lässt sich in Kombination mit Luft und Erdwärme auch in Bestandsgebäuden nutzen. Sowohl die Dachfläche als auch die Grundstücksfläche kann anhand frei verfügbarer Daten modelliert werden, weshalb die Kombination aus Solar-Luft-Kollektor und Eisspeicher im Rahmen dieser Arbeit weiter analysiert wird (vgl. Kapitel 8).

### **Grundwasser**

Für die Einordnung der Verfügbarkeit von Grundwasser ist die Tiefe des Vorkommens zu beachten. Denn im Gegensatz zu Erdwärmepumpen handelt es sich bei Grundwasserwärmepumpen (Wasser-Wasser-Wärmepumpen) um offene Systeme. Mit einer elektrischen Pumpe wird Grundwasser aus einem Brunnen gefördert, welches von der Wärmepumpe abgekühlt und anschließend wieder in einen zweiten Brunnen eingeleitet wird. Ein ausreichend großer Abstand zwischen den Brunnen und die Beachtung der Fließrichtung des Grundwassers verhindern dabei einen hydraulischen Kurzschluss. Je tiefer sich der Grundwasserleiter befindet, desto höher ist die Förderhöhe bzw. der Stromverbrauch der Pumpe. Für die Verfügbarkeit bedeutet dies, dass der Grundwasserspiegel nicht mehr als etwa 20 m unterhalb der Oberfläche liegen sollte [60]. Zum Anteil der Wohngebäude auf die dieses Kriterium zutrifft, liegen keine Daten vor.

Für die Ergiebigkeit ist weniger die Grundwassertemperatur, welche nahezu konstant bei rund 8 bis 10 °C liegt, sondern die Fördermenge entscheidend. Da das Grundwasser nicht mehr als 6 Kelvin abgekühlt werden darf, muss der Förderbrunnen ergiebig genug sein, um pro Kilowatt Heizleistung rund 200 Liter pro Stunde zu fördern. Ob dies realisierbar ist, hängt von lokalen hydrogeologischen Gegebenheiten ab. Darüber hinaus existieren Kriterien für die Wasserqualität, die v. a. das Ausfällen von Eisen- und Manganverbindungen im Brunnen vermeiden sollen. [68]

Nach [17] weisen Wasser-Wasser-Wärmepumpen bezogen auf den gesamten Endenergiebedarf nur ein geringes Potenzial auf. Zudem sind zur flächendeckenden Modellierung der hydrogeologischen Bedingungen keine frei verfügbaren Daten erhältlich. Somit erfolgt im Rahmen dieser Arbeit keine Bewertung des Grundwassers als Wärmequelle für dezentrale Wärmepumpen.

### **Abwasser**

Abwasser fällt grundsätzlich in jedem Wohngebäude an. Der jährliche Nutzenergiebedarf für Trinkwarmwasser in Wohngebäuden in Deutschland beträgt 64 TWh [59]. Diese Energie kann zum Teil zurückgewonnen werden und auch als Wärmequelle für dezentrale Wärmepumpen eingesetzt werden. In diesem Fall hat das Abwasser innerhalb des Gebäudes eine durchschnittliche Temperatur von 23 - 26 °C und wird noch vor Eintritt in die Kanalisation abgekühlt [73]. Nachteile der dezentralen Nutzung bestehen in der diskontinuierlichen Verfügbarkeit von Abwasser in Wohngebäuden und der Bildung von Biofilmen, welche die Wärmeübertragung beeinträchtigen [18].

Setzt man das in [18] ermittelte Potenzial von jährlich 22 TWh in Relation zu rund 3,8 Mrd. m<sup>2</sup> Wohnfläche in Deutschland [12], dann entspricht dies lediglich 6 kWh/(m<sup>2</sup>a). Diese überschlägige Berechnung zeigt, dass Abwasser i. d. R. nicht als alleinige Wärmequelle zur Bereitstellung des gesamten Wärmebedarfs in Wohngebäuden herangezogen werden kann. Laut [73] bietet es sich an, die dezentrale Nutzung von Abwasser als Wärmequelle für Trinkwarmwasserwärmepumpen

einzusetzen. Laut [74] hingegen eignet sich Abwasser v. a. als Wärmequelle für die zentrale Wärmeversorgung (durch Wärmetauscher am Kanal).

Da die dezentrale Nutzung von Abwasser als Wärmequelle i. d. R. nicht ergiebig genug ist, den gesamten Raumwärme- und Trinkwarmwasserbedarf mittels Wärmepumpen zu decken, wird sie nicht weiter untersucht.

### Oberflächenwasser

Auch Fluss-, See oder Meerwasser kann für Heizzwecke Wärme entzogen werden. Nur ein geringer Anteil der Gebäude in Deutschland befindet sich in direkter Nähe zum Meer oder Oberflächengewässern. Diese Wärmequelle ist somit in erster Linie für die netzgebundene Wärmeversorgung geeignet [75]. Aus diesem Grund ist diese Wärmequelle nicht Teil der folgenden Analysen.

### Gewerbliche Abwärme

Gewerbliche Abwärme fällt in der Nähe von Betrieben an. Sowohl die Temperatur als auch die zeitliche Verfügbarkeit dieser Wärmequelle können sehr unterschiedlich sein. Eine Weiterverwendung in der näheren Umgebung ist aus Sicht des Klimaschutzes in vielen Fällen zielführend, wobei v. a. die Einbindung in Wärmenetze technisch und wirtschaftlich umsetzbar sind [68].

Gewerbliche Abwärme wird nicht weiter als Wärmequelle untersucht, da diese weder flächendeckend verfügbar noch für die dezentrale Verwendung in Wohngebäuden prädestiniert ist.

### Zusammenfassung

Tabelle 3-2 fasst Kapitel 3.2.4 zusammen, wobei die weiter zu analysierenden Wärmequellen grün hervorgehoben sind. Die Angaben in Tabelle 3-2 beziehen sich auf die folgende Erschließung der Wärmequellen: Die Wärmequelle Außenluft bezieht sich auf Luft-Wasser-Wärmepumpen. Für das Erdreich werden Erdsonden und -kollektoren analysiert. Die Nutzung von Solarwärme wird anhand von Solar-Luft-Kollektoren in Kombination mit Eisspeichern untersucht.

In der Potenzialanalyse wird ein möglichst universeller Ansatz je Wärmequelle gewählt. Deshalb werden nur Varianten differenziert, die zur Bewertung der Eignung deutliche Unterschiede aufweisen. In der jeweiligen Sensitivitätsanalyse wiederum werden mögliche Unterschiede beleuchtet.

Tabelle 3-2: Wärmequellen und Eignung für den flächendeckenden Einsatz zur dezentralen Wärmeversorgung in Wohngebäuden mit Wärmepumpen

Wärmequelle	Flächendeckende Verfügbarkeit	Ergiebigkeit	Kompatibilität mit Bestandsgebäuden
Außenluft	✓	✓	✓
Erdreich	✓	✓	✓
Solarwärme	✓	✓	✓
Grundwasser	✓	○	✓
Abwasser	✓	✗	✓
Oberflächenwasser	✗	○	✓
Gewerbliche Abwärme	✗	✓	✓

✓ = zutreffend; ○ = eingeschränkt zutreffend; ✗ = nicht zutreffend

### 3.3 Zwischenfazit

---

In der Voranalyse wurde der Untersuchungsrahmen dieser Arbeit spezifiziert. Demnach wird das technische Potenzial von Wärmepumpen untersucht. Dieses entspricht der maximal möglichen Umsetzung einer Technologie, welche sich aus dem gesamten Angebot bzw. der gesamten Nachfrage unter Berücksichtigung technischer, infrastruktureller und ökologischer Einschränkungen sowie zeitlicher und räumlicher Diskrepanzen von Angebot und Nachfrage ergibt [56]. Zudem werden hierbei auch rechtliche Vorgaben (vgl. [55]) wie die Einhaltung von Richtwerten für Schallimmissionen berücksichtigt. Das Potenzial wird im Rahmen dieser Arbeit angegeben als Anteil der Wohngebäude in Deutschland, die mittels Wärmepumpen mit Wärme versorgt werden können.

Aufgrund der hohen Relevanz sowie der Verfügbarkeit von Daten werden ausschließlich Wohngebäude analysiert. Der Fokus liegt dabei auf Bestandsgebäuden, die für die Erreichung der gesetzten Ziele zur Treibhausgasreduktion essenziell sind.

In Abgrenzung zu netzgebundenen Konzepten wird ausschließlich die dezentrale Wärmeversorgung von Gebäuden bzw. eine Wärmepumpe je Gebäude analysiert.

Entsprechend Kapitel 3.2.3 werden Elektrowärmepumpen untersucht, da diese für die effektive Reduktion von Treibhausgasemissionen geeignet sind.

Weiter werden in Kapitel 3.2.4 Wärmequellen ausgewählt, die für einen flächendeckenden Einsatz in Frage kommen, mit Bestandsgebäuden kompatibel sind und deren Angebot anhand frei verfügbarer Daten quantifizierbar sind. Im Ergebnis werden Außenluft (Kapitel 6), Erdwärme (Kapitel 7) und die Kombination aus Solarkollektor und Eisspeicher (Kapitel 8) anhand von Modellen analysiert.

Demnach wird in dieser Arbeit das technische Potenzial von Wärmepumpen mit den Wärmequellen Außenluft, Erdreich und Solar/Eisspeicher zur dezentralen Wärmeversorgung des Wohngebäudebestands in Deutschland quantifiziert.

## 4 Gebäude-Modell

Zur Bewertung des Potenzials von Wärmepumpen (vgl. Kapitel 3.1) wird neben dem Energieangebot je Wärmequelle auch der Bedarf an thermischer Energie je Wohngebäude benötigt. Dieses Kapitel legt die modellhafte Abbildung des Wärmeenergiebedarfs je Wohngebäude dar. Ziel des Gebäude-Modells ist es den Gebäudebestand auf Basis frei verfügbarer Daten möglichst flächendeckend zu beschreiben. Als Bottom-up-Modell sollen relevante Eigenschaften anhand von Daten, welche in direktem Bezug zum Gebäude stehen, abgebildet werden. Dabei liegt der Fokus auf Strukturen und Parametern, die den größten Einfluss auf den Wärmeenergiebedarf haben. Wie in der Voranalyse beschrieben, werden ausschließlich Wohngebäude analysiert, wobei der Fokus auf Bestandsgebäuden liegt (vgl. Kapitel 3.2.1).

In den Kapiteln 4.1 bis 4.3 sind die Grundlagen, Methodik, Ergebnisse sowie die Validierung des Gebäude-Modells beschrieben. In Kapitel 4.4 wird ein Zwischenfazit zum Gebäude-Modell gezogen.

### 4.1 Grundlagen

Relevante Grundlagen für die weiteren Schritte sind in diesem Kapitel zusammengefasst. Hierbei werden die Definitionen der Begriffe Wärmeenergiebedarf und Stadttyp erläutert sowie Datensätze aufgeführt, welche die Basis des Gebäude-Modells bilden. Weitere Datenquellen sind in Kapitel 4.2 genannt.

#### 4.1.1 Wärmeenergiebedarf - Begriffsdefinition

Zur Ermittlung des Potenzials wird je Gebäude ermittelt wie viel thermische Energie von der Wärmepumpe benötigt wird und der Menge an Wärmeenergie gegenübergestellt, die sie bereitstellen kann. „Der Wärmeenergiebedarf stellt die Energiemenge (ohne Hilfsenergie) dar, die vom Wärmeerzeuger zu Heizzwecken und zur Warmwasserbereitung bereitgestellt werden muss“ [67] (siehe Abbildung 4-1).

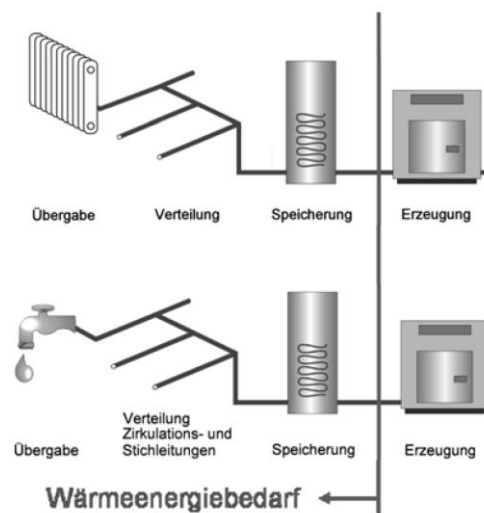


Abbildung 4-1: Begriffsdefinition Wärmeenergiebedarf [67]

Der Wärmeenergiebedarf inkludiert Verluste der Wärmeverteilung und -speicherung, jedoch nicht die Effizienz des Heizsystems selbst. Der Wärmeenergiebedarf ist nicht zu verwechseln mit der im Raum oder an der Zapfstelle benötigten Nutzenergie oder der vom Heizsystem benötigten Endenergie z. B. in Form von Strom für die Wärmepumpe.

Als Wärmeenergieangebot wird im Rahmen dieser Arbeit die Menge an thermischer Energie bezeichnet, welche die Wärmepumpe aus Umweltwärme und Strom zu Heizzwecken bereitstellen kann, um den Wärmeenergiebedarf zu decken.

#### 4.1.2 OpenStreetMap

OpenStreetMap (OSM) ist ein Projekt, in dem weltweit Geodaten gesammelt, strukturiert und für die freie Nutzung in einer Datenbank bereitgestellt werden [37]. OSM ist in Deutschland flächendeckend verfügbar, wohingegen amtliche Gebäudedaten nicht für alle Bundesländer frei erhältlich sind. Für die Untersuchungen in dieser Arbeit werden verschiedene Daten aus [37] verwendet. Die Grundlage aller Untersuchungen sind die Geodaten der Gebäudeumrisse. Zudem werden die Geodaten von Straßen herangezogen, welche im Luftwärme-Modell (vgl. Kapitel 6.2.2.3) und Erdwärme-Modell (vgl. Kapitel 7.2.2) Anwendung finden. Darüber hinaus werden die Metadaten der Gebäude verwendet. Die Eigenschaften der Gebäude sind anhand sogenannter „Tags“ (engl. für Bezeichnung) hinterlegt. Ein Tag besteht aus einem Schlüssel (key) und einem Wert (value). Der key kann dabei mehrstufig aufgebaut sein, wobei die Ebenen mit Doppelpunkt getrennt werden. So kann beispielsweise mit dem Tag `addr:housenumber= 1a` die Hausnummer spezifiziert werden.

#### Entwicklung der Anzahl an Gebäuden

Die Anzahl der Gebäudepolygone, welche in [37] erfasst sind hat in den letzten Jahren kontinuierlich zugenommen (siehe Abbildung 4-2) und umfasst sowohl Wohngebäude als auch Nichtwohngebäude.

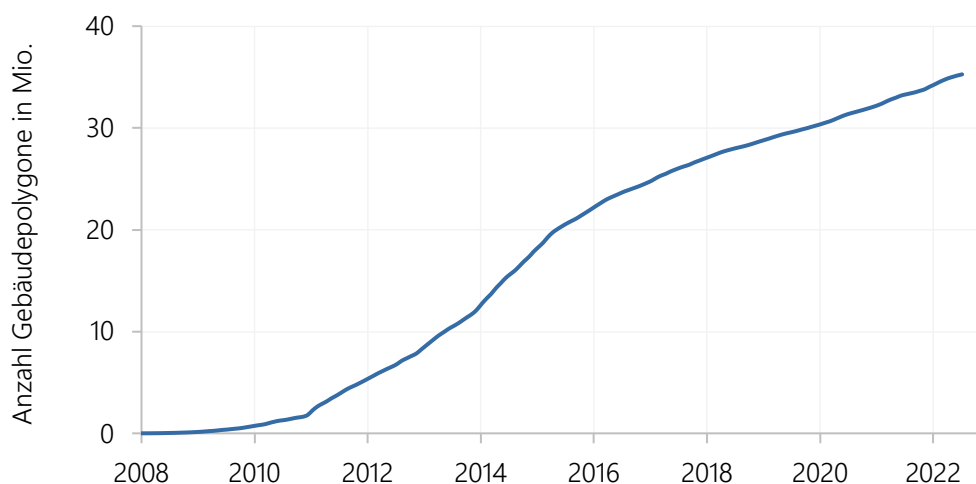


Abbildung 4-2: Anzahl der Gebäudepolygone in OpenStreetMap 2008 - 2022 [76]

Die Grundlage der Auswertungen in dieser Arbeit ist der Datensatz vom 24. Januar 2022. Die von 2. Februar 2021 bis 24. Januar 2022 beobachtete Zunahme an Gebäudepolygonen erfolgte v. a. in ländlichen Gebieten von Ost- und Norddeutschland (vgl. Abbildung 4-3). Insgesamt sind in diesem Zeitraum rund 2,5 Mio. Gebäudepolygone hinzugekommen. Diese Information wird zur Interpretation der Ergebnisse in Kapitel 4.3 herangezogen.



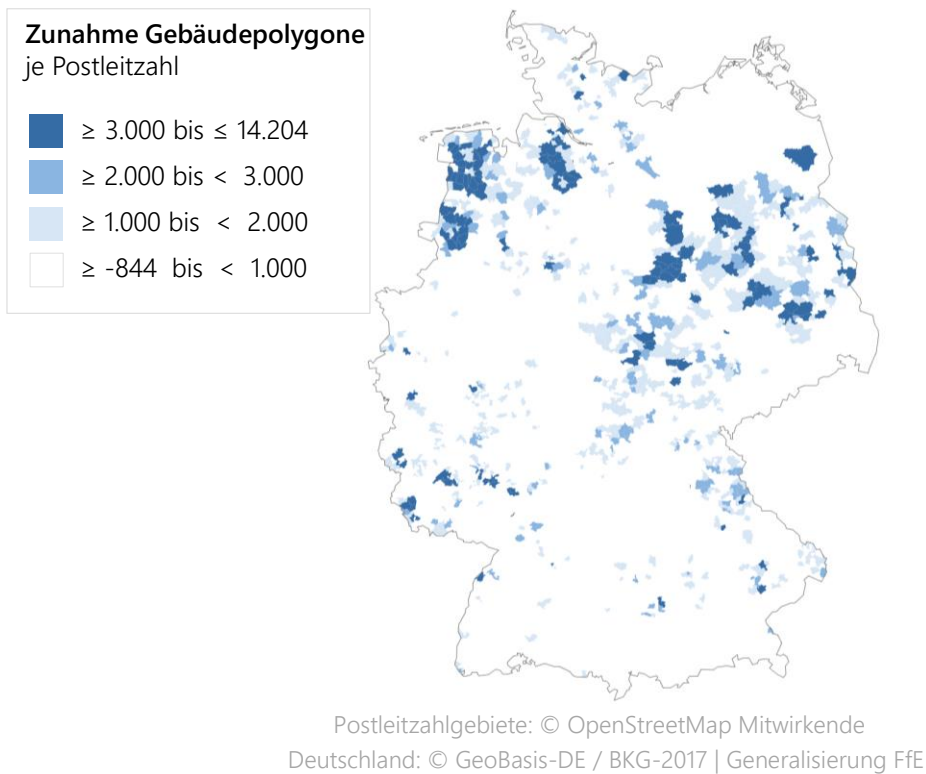


Abbildung 4-3: Zunahme der Gebäudepolygone in OpenStreetMap je Postleitzahl 2021 - 2022, eigene Darstellung aus Daten von [77] und [37]

#### Unterscheidung Einzelgebäude und Gebäudekomplex

Die Unterscheidung von einzelnen Gebäuden und Gebäudekomplexen ist bei der Angabe zur Anzahl von Gebäuden sehr wichtig. Ein Wohngebäude besitzt eine Hausnummer (vgl. [78]), ein Gebäudekomplex mehrere (vgl. Abbildung 4-4).

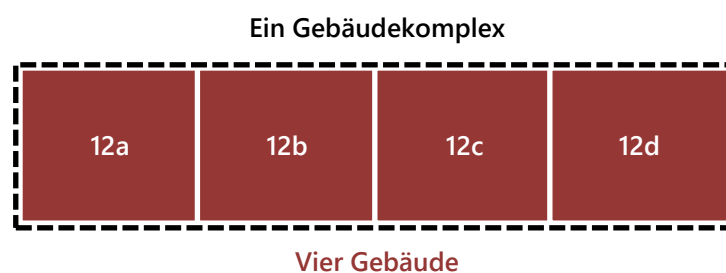


Abbildung 4-4: Unterscheidung von Gebäude und Gebäudekomplex

Angaben in der Statistik, wie 19,3 Mio. Wohngebäude in Deutschland [12], beziehen sich auf Gebäude. In [37] sind nicht alle Gebäudekomplexe unterteilt und teilweise sind auch Gebäude in einzelne Gebäudeteile (wie nachträgliche Anbauten) differenziert. Dies stellt eine Herausforderung für die Klassifikation der Gebäudetypen sowie die Angabe zur Anzahl der Gebäude dar (vgl. Kapitel 4.2.1).

#### 4.1.3 Zensus-Daten

In [79] wurde der Bestand an Wohnungen und Gebäuden mit Wohnraum in der Bundesrepublik Deutschland erstmals flächendeckend und vollständig erfasst. Diese Vollerhebung wurde mittels schriftlicher, postalischer Befragung der Eigentümer:innen bzw. Verwalter:innen der Gebäude und Wohnungen durchgeführt. Auf diese Weise wurden Daten zum Typ, Nutzung, Art und Baujahr der

Gebäude sowie die Anzahl und Wohnfläche an Wohnungen erhoben. Die Daten sind sowohl tabellarisch (vgl. [47]) als auch in Form von Rasterdaten in 100x100 m Auflösung (vgl. [45]) frei verfügbar. Die Zensus-Daten werden für das Gebäude-Modell in dieser Arbeit verwendet, um den spezifischen Wärmeenergiebedarf mittels Baualter abzubilden (vgl. Kapitel 4.2.3) sowie zur Kalibrierung bzw. Validierung der Gebäudetyp-Klassifikation (vgl. Kapitel 4.2.1). Veränderungen des Bestands seit der Erhebung dieser Daten werden als unbedeutend eingestuft, da zum einen nur ein marginaler Anteil der Gebäude abgerissen wurde (vgl. [12]) und zum anderen neu errichtete Gebäude mit einem Ersatzwert für den spezifischen Wärmeenergiebedarf belegt werden können.

#### 4.1.4 Gebäudehöhe

---

Neben dem zweidimensionalen Grundriss spielt die Höhe der Gebäude eine wichtige Rolle zur Quantifizierung des Wärmeenergiebedarfs. Für die Gebäudehöhe werden zwei Datenquellen verwendet, die nachfolgend beschrieben werden.

**Amtliche Daten zur Gebäudehöhe:** Zur Erstellung des Gebäude-Modells waren für sechs deutsche Bundesländer (Berlin, Brandenburg, Sachsen, Thüringen, Hamburg und Nordrhein-Westfalen) amtliche Daten zur Gebäudegeometrie frei verfügbar. Diese Daten werden im Detaillierungsgrad 2 (engl. Level of Detail 2, kurz LoD2), sprich als dreidimensionales Modell mit vereinfachter, standardisierter Dachform zur Verfügung gestellt. Die im Vergleich zu den OSM-Daten höhere Auflösung dieser Gebäudedaten stellt vor dem Hintergrund des angestrebten Ziels eine Herausforderung dar. Kritisch ist vor allem, dass viele Gebäudeteile separat erfasst sind, ohne dass die Zugehörigkeit zu den Gebäuden hinterlegt ist. Da das Potenzial von Wärmepumpen je Gebäude quantifiziert werden soll, werden für die Grundrisse aller Gebäude die OSM-Daten herangezogen. Die Gebäudehöhe wird aus amtlichen Daten abgeleitet. Hierzu werden die OSM-Grundrisse mit den Gebäudeteilen der LoD2-Daten räumlich verschnitten. Um auszuschließen, dass die Höhe nicht nur für einen untergeordneten Gebäudeteil zutrifft, wird die Höhe des Gebäudeteils mit dem größten Anteil am Gesamtvolumen verwendet.

**Aus Satellitenbildern abgeleitete Gebäudehöhe:** Für die Bundesländer, welche keine LoD 2-Daten zur freien Verfügung stellen, werden aus Satellitendaten abgeleitete Höheninformation aus [44] herangezogen. In diesem Datensatz wurden Gebäudehöhen auf Basis von Zeitreihen von Satellitenbildern bestimmt. Das Ergebnis ist ein deutschlandweites Raster mit einer Auflösung von 10x10 m, welches frei erhältlich ist.

#### 4.1.5 Stadt- bzw. Gemeindetyp

---

Nach [80] lassen sich Städte bzw. Gemeinden anhand Ihrer Einwohnerzahl unterteilen in:

- Landgemeinden: unter 5.000 Einwohner
- Kleinstädte: 5.000 bis unter 20.000 Einwohner
- Mittelstädte: 20.000 bis unter 100.000 Einwohner
- Großstädte: ab 100.000 Einwohner

In [80] ist die Zuordnung je Stadt bzw. Gemeinde zu den genannten Klassen hinterlegt (vgl. Abbildung 14-2 im Anhang). Mit dem allgemeinen Gemeindegeschlüssel und Geodaten der Gemeinden nach [81] kann diese Information georeferenziert werden. So kann jedes einzelne Gebäude einer Klasse zugeordnet werden. Diese Aufteilung wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet, um Unterschiede in den Modellergebnissen für Stadt und Land greifbar darzustellen (vgl. Kapitel 6.3.2, 7.3.2, 8.3.2 und 9).

## 4.2 Methodik

Im folgenden Kapitel ist die Methodik zur flächendeckenden Abbildung des Wärmeenergiebedarfs je Wohngebäude in Deutschland erläutert. Dieses Bottom-up-Modell basiert auf den in Kapitel 4.1 beschriebenen und weiteren Daten. In Abbildung 4-5 sind die relevanten Parameter und deren Abhängigkeiten zur Ermittlung des Wärmeenergiebedarfs dargestellt.

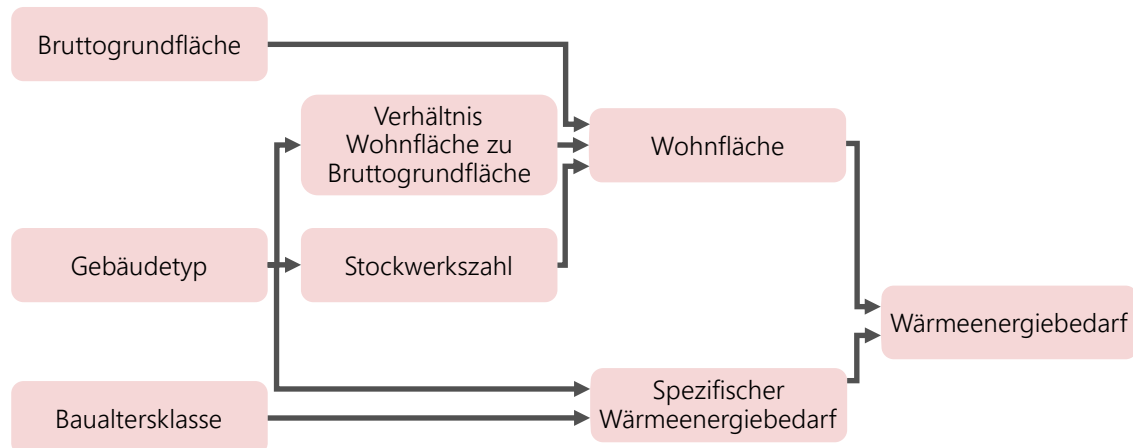


Abbildung 4-5: Überblick Methodik Gebäude-Modell

Der Gebäudetyp (vgl. Kapitel 4.2.1) wird anhand der Geometrie und Metadaten, wie der Anzahl an Hausnummern bestimmt. Die Wohnfläche (vgl. Kapitel 4.2.2) wird durch die Multiplikation von Bruttogrundfläche, Stockwerkszahl sowie dem Verhältnis von Wohnfläche zu Bruttogrundfläche berechnet. Das Verhältnis von Wohnfläche zu Bruttogrundfläche bezieht sich dabei auf ein Stockwerk. Der spezifische Wärmeenergiebedarf (vgl. Kapitel 4.2.3) basiert auf der Baualterklasse und dem Gebäudetyp. Der Wärmeenergiebedarf je Gebäude ergibt sich durch die Multiplikation der Wohnfläche mit dem spezifischen Wärmeenergiebedarf.

### 4.2.1 Gebäudetyp

Der Gebäudetyp der Wohngebäude wird für die Approximation der Wohnfläche und des spezifischen Wärmeenergiebedarfs herangezogen. Die Daten nach [37] enthalten sowohl Wohngebäude als auch Nichtwohngebäude. Die für die geplanten Analysen benötigten Wohngebäudetypen sind in [37] nur in wenigen Fällen gepflegt. Aus diesem Grund werden zuerst Nichtwohngebäude identifiziert (Kapitel 4.2.1.1), um die dann verbleibenden Wohngebäude hinsichtlich des Gebäudetyps in fünf Klassen zu unterteilen.

Kapitel 4.2.1 stellt eine Zusammenfassung der im Rahmen von [82] entwickelten Methodik dar. Diese Zusammenfassung fokussiert sich auf die für die darauf aufbauenden Parameter und Interpretationen relevanten Aspekte. Details zur Datenverarbeitung und -prozessierung sind in [82] beschrieben. Die Klassifikation wird in identischer Reihenfolge wie die Nennung in diesem Kapitel ausgeführt. In jedem Schritt werden nur diejenigen Gebäude betrachtet, welche durch vorangegangene Schritte noch nicht klassifiziert wurden.

#### 4.2.1.1 Ausschluss von Nichtwohngebäuden

Im ersten Schritt werden Nichtwohngebäude von den weiteren Analysen ausgeschlossen. Eingangs beinhalten die Daten von [37] 34,3 Mio. Gebäudepolygone (Stand: 24. Januar 2022). Dieses Kapitel legt dar, wie Garagen, Nebengebäude und sonstige Nichtwohngebäude anhand von Metadaten, der Geometrie und der Landnutzung erfasst werden.

## Garagen

Anhand der Geometrie und der Beschreibung von Gebäuden werden Garagen identifiziert. Mittels regulärer Ausdrücke werden alle OSM-Tags auf das Stichwort „garage“ überprüft: 28 zutreffende Tags – u. a. „building:garage“, „building:garages“, „description:garage“ u. v. m. – treten im gesamten Datensatz häufiger als zehn Mal auf und weisen auf Garagen hin. Weiter werden die geometrischen Eigenschaften der Polygone genutzt, um Einzelgaragen (mit einer Breite bis 5 m) in der direkten Nähe (bis 2,5 m) von Ein-/ Zweifamilienhäusern (Gebäude bis 250 m<sup>2</sup> Bruttogrundfläche) zu identifizieren. Insgesamt werden 2,1 Mio. Gebäudepolygone als Garagen identifiziert.

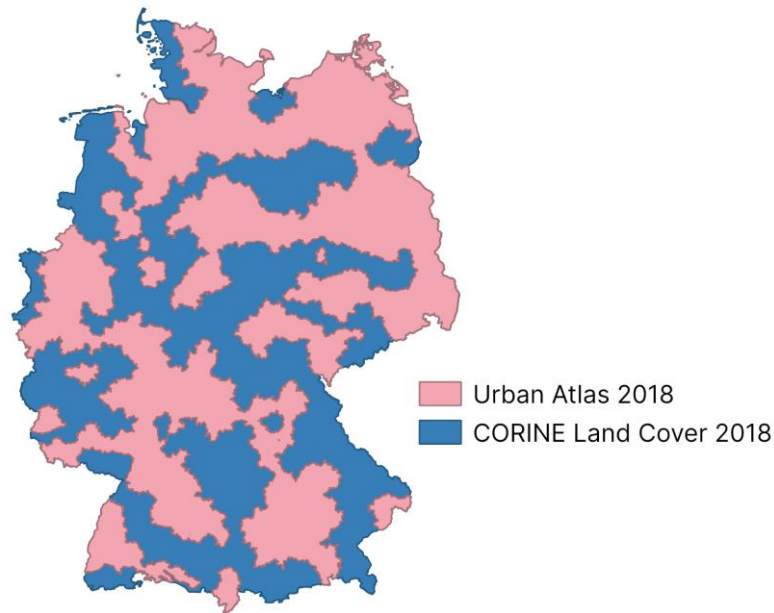
## Nebengebäude

Daraufhin werden untergeordnete Gebäude mit einer geringen Grundfläche wie Schuppen, Gartenhäuser o. ä. in der Klasse Nebengebäude zusammengefasst. Dabei wird angenommen, dass mit abnehmender Bruttogrundfläche des Gebäudes eine Wohnnutzung weniger wahrscheinlich ist. Die Bruttogrundfläche wird anhand der Gebäudegeometrie in der flächentreuen Projektion EPSG:3035 bestimmt. Alle Gebäude mit einer Bruttogrundfläche kleiner 40 m<sup>2</sup> werden dieser Klasse zugeordnet. Gebäude mit einer Bruttogrundfläche zwischen 40 und 60 m<sup>2</sup> werden ebenfalls als Nebengebäude klassifiziert, falls diese keine Hausnummer aufweisen. Zu diesem Zweck wird die Anzahl der Hausnummern je Polygon bestimmt. Diese Information kann in den Metadaten der Gebäudepolygone oder nahegelegenen Punktgeometrien hinterlegt sein. Deshalb werden die Polygone und im Umkreis von 0,5 m befindliche Punkte auf den Tag „addr:housenumber“ hin ausgewertet. Mehrfach auftretende Hausnummern je Gebäude werden nicht berücksichtigt. Die Anzahl der Hausnummern ist zudem eine wichtige Eingangsgröße für die Klassifikation der Wohngebäudetypen (vgl. Kapitel 4.2.1.2).

## Sonstige Nichtwohngebäude

Über Garagen und Nebengebäude hinaus werden weitere Nichtwohngebäude anhand der Landnutzung und der Bezeichnung erfasst. Eine Differenzierung in weitere Subklassen ist nicht zielführend, weshalb die in diesem Abschnitt erläuterten Gebäude als „Sonstige Nichtwohngebäude“ zusammengefasst werden.

Um Gebiete zu identifizieren, welche überwiegend Nichtwohngebäude beinhalten (z. B. Industrie- oder Gewerbegebiete) werden Daten zur Landnutzung herangezogen. Zum einen wird der Datensatz „CORINE Land Cover“ [83] mit 44 Landbedeckungs- bzw. -nutzungsklassen und einer minimalen Kartiereinheit von 1 ha verwendet. Zum anderen wird der „Urban Atlas“ [84] herangezogen, welcher Ballungsräume mit einer minimalen Kartiereinheit von 0,25 ha bzw. einer höheren Auflösung abdeckt. Der „Urban Atlas“ deckt rund 55 % der Fläche Deutschlands ab, während „CORINE Land Cover“ für ganz Deutschland verfügbar ist und somit für die restlichen Gebiete eingesetzt werden kann (vgl. Abbildung 4-6).



CORINE Land Cover: © GeoBasis-DE / BKG (2021)

Abbildung 4-6: Landnutzung – Abdeckung von URBAN Atlas [84] und CORINE Land Cover [83], Abbildung aus [82]

Die Zuordnung von Landnutzung zu Gebäudepolygon erfolgt auf Basis der größten Schnittfläche der Geometrien. Gebäudepolygone, deren Landnutzung der Industrie, dem Gewerbe, der Land- oder Forstwirtschaft o. ä. zuzuordnen sind, werden als sonstige Nichtwohngebäude klassifiziert. Aufgrund der festgestellten Lagegenauigkeit von Straßen werden die Klassen der Landnutzung der Verkehrsinfrastruktur von diesem Vorgehen ausgeschlossen.

Um auch Nichtwohngebäude zu identifizieren, welche sich innerhalb von Wohngebieten befinden (z. B. Bildungseinrichtungen, Museen, Einzelhandel u. v. m.) ist die Auflösung der Landnutzungsdaten nicht ausreichend. Zur Identifikation derartiger Gebäude werden die Metadaten von OSM analysiert. Die Verwendung regulärer Ausdrücke zur stichwortbasierten Suche nach spezifischen Bezeichnungen ist aufgrund der Vielzahl und Heterogenität der Tags nicht zielführend. Deshalb werden die vorkommenden Tags systematisch ausgewertet. Zuerst werden irrelevante Tags, welche sich beispielsweise auf die Erfassung oder die Adresse des Gebäudes beziehen, mittels regulärer Ausdrücke ausgeschlossen. Danach werden diese nach Häufigkeit absteigend sortiert, gesichtet und manuell Kategorien zugeordnet. Dabei werden Tags mit dem Schlüssel „building“ bis zu einer Häufigkeit von über zehn Gebäuden und Tags mit Schlüsselwörtern wie „description“, „amenity“ oder „shop“ aufgrund ihrer Vielzahl bzw. Heterogenität bis zu einer Häufigkeit von rund 1.000 Gebäuden ausgewertet. In Summe werden auf diese Weise 331 unterschiedliche Tags untersucht. Tabelle 4-1 zeigt die Kategorien inklusive Beschreibung, die drei häufigsten Tags und die entsprechende Anzahl an OSM-Polygonen.

Tabelle 4-1: Analyse von OSM-Tags zur Identifikation von Nichtwohngebäuden, eigene Auflistung aus [82] auf Basis von [37]

Nr.	Gebäudetyp	Beschreibung	OSM-Tag	Anzahl Gebäudepolygone
1	Sonstige Wohngebäude	Entsprechen <b>nicht</b> den fünf Klassen nach Kapitel 4.2.1.2	building = farm	15.683
			building = bungalow	4.259
			building = dormitory	2.284
2	Wohngebäude	Entsprechen den fünf Klassen nach Kapitel 4.2.1.2	building = house	2.300.968
			building = residential	994.450
			building = apartments	752.484
3	Ungenutzte Gebäude	Gebäude, welche keiner Nutzung unterliegen	building = construction	5.671
			building = ruins	1.845
			abandoned = yes	909
4	Nichtwohngebäude	Überwiegende Nichtwohnnutzung	building = farm auxiliary	36.324
			building = shed	33.529
			building = commercial	29.164
5	Gebäude mit Mischnutzung	z. B. mehrstöckiges Wohnhaus mit Einzelhandel im Erdgeschoss	amenity = restaurant	11.663
			building:use = residential;industrial	11.635
			amenity = kindergarten	5.693

Einem Gebäudepolygon können mehrere Tags zugeordnet sein, weshalb die Klassifikation in einer definierten Reihenfolge (siehe Nr. in Tabelle 4-1) ohne Überschreiben des Gebäudetyps ausgeführt wird. Als Nichtwohngebäude werden auf diese Weise 0,4 Mio. Gebäude identifiziert.

### Zwischenergebnis

Abbildung 4-7 fasst die Ergebnisse zum Ausschluss von Nichtwohngebäuden (Kapitel 4.2.1.1) zusammen: Die Eingangsdaten umfassen 34,3 Mio. Gebäudepolygone, wovon 2,1 Mio. als Garagen, 7,4 Mio. als Nebengebäude, 3,8 Mio. als Nichtwohngebäude mittels Landnutzung und 0,4 Mio. als Nichtwohngebäude mittels Tags klassifiziert werden. Damit verbleiben 20,6 Mio. Gebäudepolygone, welche potenziell Wohngebäude sind.

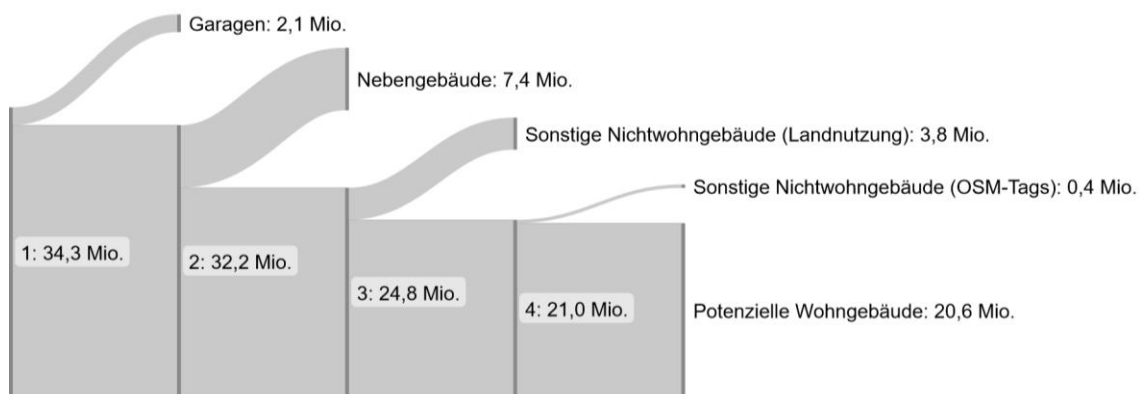


Abbildung 4-7: Ausschluss von Nichtwohngebäuden, eigene Darstellung auf Basis von [82]

#### 4.2.1.2 Klassifikation von Wohngebäuden

Nach dem Ausschluss von Nichtwohngebäuden enthält der Datensatz 20,6 Mio. potenzielle Wohngebäude. Ziel der im Folgenden beschriebenen Methodik ist es, möglichst viele der Wohngebäude zu identifizieren, indem sie einem Wohngebäudetyp zugeordnet werden. Hierfür werden Klassen definiert, die Eigenschaften von Gebäuden analysiert und ein Referenzdatensatz erstellt, um dann die Klassifikation durchzuführen. Aufgrund der Heterogenität des Gebäudebestands als auch der Datenqualität ist die Klassifikation mehrstufig: Zuerst werden gereichte Gebäude anhand von Regeln identifiziert und anschließend freistehende Gebäude mittels Wahrscheinlichkeiten Klassen zugeordnet.

##### **Gebäudetyp-Klassen**

Die Auswahl der Gebäudetyp-Klassen erfolgt in Anlehnung an [46] und richtet sich einerseits nach der Verfügbarkeit von Daten wie [45], zum anderen wurden Klassen gewählt, die sich deutlich voneinander abgrenzen lassen. Die folgenden fünf Gebäudetypen werden differenziert:

- Ein-/ Zweifamilienhaus
- Doppelhaushälfte
- Reihenhaus
- Kleines Mehrfamilienhaus (drei bis sechs Wohneinheiten)
- Großes Mehrfamilienhaus (mehr als sieben Wohneinheiten)

Da diese Benennungen nicht einheitlich verwendet werden, sind sie im Rahmen dieser Arbeit folgendermaßen definiert: Ein-/ Zweifamilienhäuser bzw. kleine Mehrfamilienhäuser sind freistehende Gebäude. Reihenhaus-Komplexe bestehen mindestens aus drei Gebäuden. Große Mehrfamilienhäuser können sowohl freistehend als auch gereicht sein.

##### **Geometrische Eigenschaften**

Zur Unterscheidung von Gebäudetypen werden die geometrischen Eigenschaften von Wohngebäuden eingehend analysiert. Um Gebäude nicht isoliert, sondern im Kontext ihrer direkten Nachbarschaft zu betrachten, wird die Zugehörigkeit zu Gebäudekomplexen untersucht. So werden freistehende und aneinander angrenzende Gebäude differenziert. Für gereichte Gebäude kann die Geometrie des Gebäudekomplexes bestimmt werden (vgl. Abbildung 4-4). Garagen und Nebengebäude werden hierbei nicht berücksichtigt. Sonstige Nichtwohngebäude werden mit einbezogen, um einer Fragmentierung v. a. in städtischen Gebieten entgegenzuwirken. Auf Grundlage der 24,8 Mio. Gebäude (ohne Garagen und kleine Nebengebäude) werden 3,5 Mio. Gebäudekomplexe berechnet. Für die weiteren Analysen werden die folgenden Eigenschaften der Komplexe ausgewertet:

- Anzahl der Gebäude im Gebäudekomplex
- Fläche des kleinsten Polygons im Gebäudekomplex
- Fläche des größten Polygons im Gebäudekomplex
- Anzahl an Hausnummern im Gebäudekomplex

Neben der Komplexgeometrie wird auch die Gebäudegeometrie analysiert. In diesem Zusammenhang werden viele Eigenschaften wie Umfang, Kompaktheit, Anzahl der Punkte u. v. m. ausgewertet. Für die nachfolgend beschriebenen Methoden haben sich v. a. folgende Eigenschaften als nützlich erwiesen:

- Bruttogrundfläche des Gebäudes
- Anzahl an Hausnummern
- Gebäudehöhe

Neben den genannten wurden in [82] weitere Eigenschaften wie Länge, Breite, Umfang, Kompaktheit geprüft.

Eine Herausforderung der Gebäudetypklassifikation ist, dass es in OSM allein dem Erfassenden obliegt, ob separate Gebäude oder der gesamte Gebäudekomplex erfasst werden. Dies hat zur Folge, dass ein Teil der Polygone im Sinne der Definition von Abbildung 4-4 fälschlicherweise unterteilt oder nicht unterteilt sind. Ein Gebäude ist fälschlicherweise unterteilt, wenn ein Gebäudeteil (z.B. Anbau) als separates Polygon erfasst wurde. Ein Gebäudekomplex hingegen ist demnach nicht ausreichend erfasst, wenn lediglich der Komplex aber nicht die einzelnen Gebäude erfasst sind. Im Rahmen der Gebäudetyp-Klassifikation werden nicht unterteilte Gebäudekomplexe ebenfalls klassifiziert. Ziel ist es die Anzahl der darin enthaltenen Wohngebäude, deren Wohnfläche und Wärmeenergiebedarf zu ermitteln. Für die Quantifikation des Wärmeenergieangebots der Wärmequellen hingegen bleiben die rund 240.000 nicht unterteilten Gebäudekomplexe außen vor, da die Nachbarschaft bzw. einzuhaltende Abstände für den Immissionsschutz oder die Erschließung von Erdwärme auf dieser Basis nicht abbildbar sind.

### Referenzdaten

Für die Kalibrierung des Modells zur Gebäudetyp-Klassifikation werden ausreichend Referenzdaten – sprich Gebäude mit bekanntem Gebäudetyp – benötigt. In [77] sind Daten zum Gebäudetyp nur in geringem Umfang vorhanden und decken die definierten Klassen nicht ab. Amtliche Daten zum Gebäudetyp (vgl. [38]) sind ebenfalls nicht mit den definierten Klassen kompatibel. Aus den genannten Gründen wird eine Referenz aus OSM-Grundrissen [77] und Zensus-Rasterdaten (100 x 100 m-Auflösung) [45] zum Gebäudetyp erstellt. Hierbei werden Zensus-Zellen ausgewählt, welche lediglich einen Gebäudetyp enthalten. Dann werden OSM-Gebäude diesen Zellen anhand des Schwerpunkts der Polygone zugeordnet. Für die Abgrenzung der verschiedenen Gebäudetypklassen wird ein Referenzdatensatz benötigt, in dem der Gebäudetyp möglichst korrekt erfasst ist. Um potenzielle Fehlzuordnungen zu reduzieren, werden lediglich OSM-Gebäude in der Referenz berücksichtigt, deren Anzahl an Hausnummern mit der Anzahl an Gebäuden im Komplex übereinstimmt. Für Ein-/Zweifamilienhäuser, kleine Mehrfamilienhäuser und große Mehrfamilienhäuser (freistehend) werden nur Gebäude ohne Komplex analysiert. Den Komplexen von Doppelhäusern müssen zwei, den von Reihenhäusern und großen Mehrfamilienhäusern (gereiht) mindestens drei Hausnummern zugeordnet sein. Durch diese Filterung der Daten kann von einer akkuraten Erfassung der Gebäude ausgegangen werden.

Eine Hälfte des Datensatzes wird für die Kalibrierung und die andere Hälfte für die Validierung der Gebäudetyp-Klassifikation eingesetzt. Um bei der Aufteilung eine räumliche Verteilung zu gewährleisten, erfolgt die Halbierung des Datensatzes je Postleitzahl.

### Siedlungsräume

Zur Berücksichtigung des Kontexts von Gebäuden – im folgenden Siedlungsraum genannt – wurde in [82] die Wohnflächendichte auf Basis von [45] analysiert. Diese Information findet im Rahmen der Gebäudetyp-Klassifikation Anwendung. Die Vorgehensweise zur Bestimmung, sowie das Ergebnis sind im Folgenden zusammengefasst. Die nachfolgend definierten Siedlungsräume bilden den Übergang von städtischen zu ländlichen Bereichen detaillierter ab, weshalb sie für die Klassifikation des Gebäudetyps den oben genannten Stadttypen (vgl. Kapitel 4.1.5) vorgezogen werden.



In den Rasterdaten von [45] ist in 100x100 m Auflösung die Wohnfläche in Intervallen von 10 m<sup>2</sup> und die entsprechende Anzahl an Wohnungen hinterlegt. Als Gebietseinheit zur Beschreibung der Wohnflächendichte wird die Postleitzahl verwendet. Durch räumliche Verschneidung der Mittelpunkte der Rasterzellen mit den Geometrien der Postleitzahlen nach [37] wird die Wohnfläche je Postleitzahl ermittelt. Als Bezugsfläche dient nicht die gesamte Fläche der Postleitzahl, sondern die Grundfläche aller Rasterzellen, welche Werte bzw. Wohngebäude enthalten. Weiter wurden für die drei Siedlungsräume ländlich, suburban und urban durch manuelle Sichtung Klassengrenzen definiert. Abbildung 4-8 zeigt diese drei Siedlungsräume je Postleitzahl.

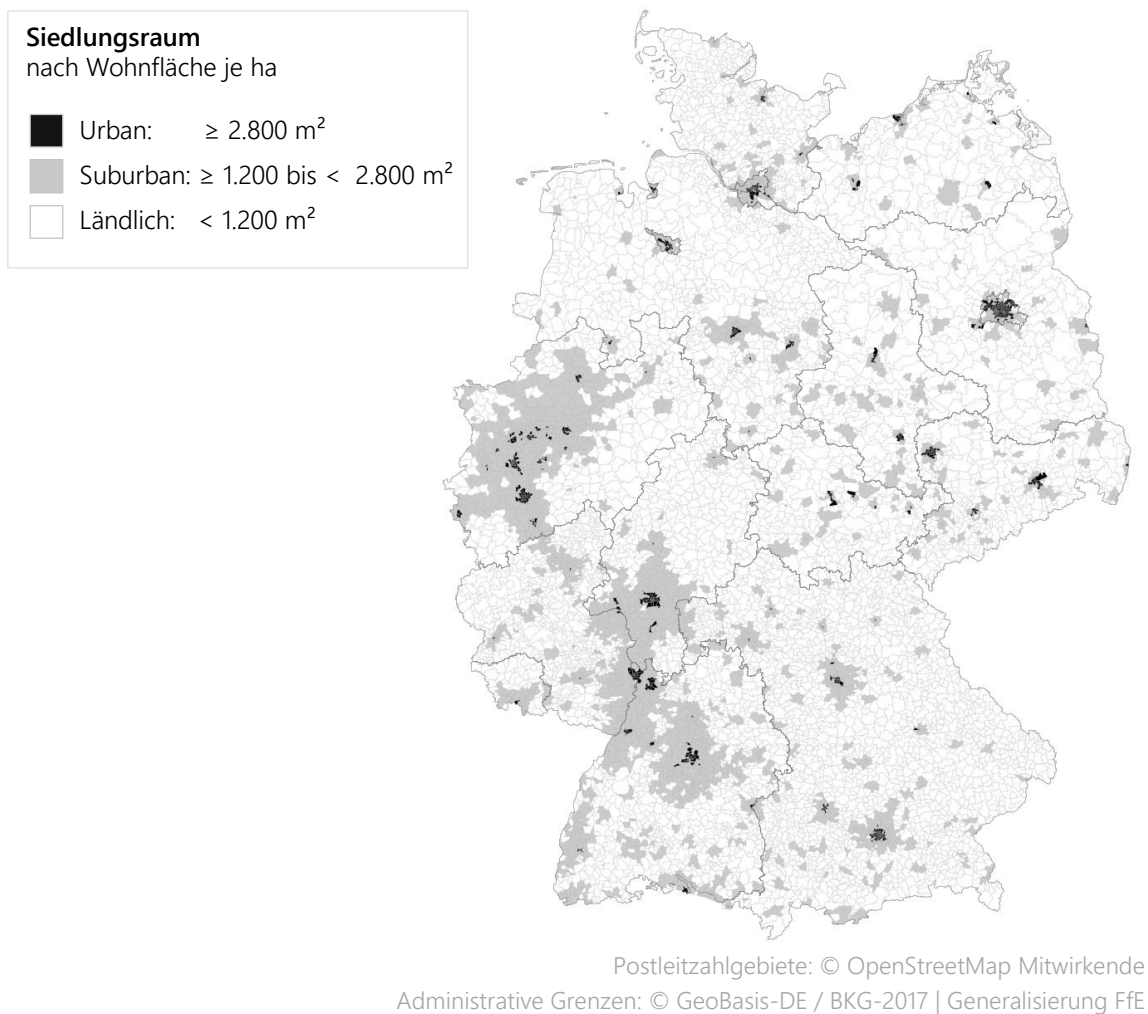


Abbildung 4-8: Siedlungsraum je Postleitzahl, eigene Darstellung auf Basis von [45] und [37]

### Regelbasierte Klassifikation

Auf Basis des Referenzdatensatzes wurden für die verschiedenen Gebäudetypen charakteristische Eigenschaften der Gebäudegeometrie gesucht. Anhand statistischer Auswertungen wie Histogrammen wurden Regeln zur Unterscheidung von Gebäudetypen entwickelt. Dies erfolgte sowohl für die geometrischen Eigenschaften der Gebäude als auch separat für die Gebäudekomplexe.

Es zeigte sich, dass Reihenhäuser und gereichte, große Mehrfamilienhäuser gut anhand ihrer Bruttogrundfläche je Gebäude differenzierbar sind. Befindet sich ein Gebäude in einem Gebäudekomplex mit mehr als drei Hausnummern und die Bruttogrundfläche liegt unter dem Schwellenwert von 130 m<sup>2</sup> wurde es als Reihenhauser klassifiziert, oberhalb des Schwellenwerts als gereichtes großes Mehrfamilienhaus.

Doppelhaushälften besitzen aufgrund Ihrer einseitig angrenzenden Bebauung und dem Größenverhältnis ebenfalls spezifische Eigenschaften, welche eine regelbasierte Erkennung ermöglichen. Dabei verfügen angrenzende Doppelhaushälften über ähnlich große Bruttogrundflächen. Ist die Fläche eines der beiden Polygone deutlich kleiner, dann könnte es sich auch um ein Ein-/ Zweifamilienhaus mit Garage handeln.

Die ermittelten Schwellenwerte sind in Tabelle 4-2 zusammengefasst, wobei jede Zeile für eine separate Regel steht.

Tabelle 4-2: Zusammenfassung der regelbasierten Gebäudetyp-Klassifikation

Gebäudetyp	Eigenschaften des Gebäudes		Eigenschaften des Gebäudekomplexes				
	Anzahl Hausnummern	Bruttogrundfläche (BGF) in m <sup>2</sup>	Anzahl Gebäude (n <sub>Geb</sub> )	Anzahl Hausnummern	Bruttogrundfläche (BGF) in m <sup>2</sup>	Min(BGF) / Max(BGF)	BGF/ Anzahl Hausnummern in m <sup>2</sup>
Doppelhaushälfte	=1		=2	=2	<=130	>0,705*	
	=1		=2	<2	<=130	>0,883**	
			=1	=2	<=130		
Reihenhaus	=1	<=130	>=3	=n <sub>Geb</sub>			
	<=1	<=130	>=3	<n <sub>Geb</sub>			
			=1	>=3			<=130
Großes Mehrfamilienhaus (gereiht)	=1	>130	>=3	=n <sub>Geb</sub>			
	<=1	>130	>=3	<n <sub>Geb</sub>			
			=1	>=3			>130

\* entspricht 10. Perzentil im Referenzdatensatz

\*\* entspricht 1. Quartil im Referenzdatensatz

Aufgrund der spezifischen Eigenschaften gereihter Gebäude ist die Einteilung der Klassen Doppelhaus, Reihenhaus und gereihtes großes Mehrfamilienhaus anhand von Schwellenwerten möglich. Für freistehende Wohngebäude konnten aufgrund großer Überschneidungen der Merkmalsausprägungen keine eindeutigen Schwellenwerte identifiziert werden. Deshalb wurde die im folgenden Abschnitt erläuterte Klassifikation mittels Wahrscheinlichkeit entwickelt.

### Klassifikation mittels Wahrscheinlichkeiten

Freistehende Gebäude unterliegen bzgl. ihrer Geometrie keinen Zwängen gegenüber direkt angrenzenden Gebäuden, weshalb ihr Grundriss sehr unterschiedlich geformt sein kann. Ziel der im folgenden beschriebenen Methodik ist es herauszufinden, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Gebäude auf Basis seiner geometrischen Eigenschaften der Klasse Ein-/ Zweifamilienhaus, kleines Mehrfamilienhaus oder großes Mehrfamilienhaus zuzuordnen ist.

Zu diesem Zweck wird der oben beschriebene Referenzdatensatz mit rund 0,43 Mio. Gebäuden und bekanntem Gebäudetyp ausgewertet. Als nützlich haben sich die geometrischen Eigenschaften Bruttogrundfläche und Gebäudehöhe erwiesen. Zusätzlich wird die Wohnflächendichte je Postleitzahl herangezogen, um den räumlichen Kontext des Gebäudes zu berücksichtigen. Zu Beginn werden die Daten nach Höhe und Bruttogrundfläche gefiltert, um Ausreißer im Datensatz zu eliminieren. Die anschließend berechnete Wahrscheinlichkeit basiert auf der relativen Häufigkeit je Gebäudetyp in dem dreidimensionalen Raum an Merkmalsausprägungen. Der Raum ist dabei in diskrete Intervalle unterteilt, wobei deren Schrittweite einen Kompromiss aus Detailgrad und Abdeckung des Wertebereichs darstellt. Die Schrittweite beträgt  $20 \text{ m}^2$  für die Bruttogrundfläche,  $1 \text{ m}$  für die Gebäudehöhe und  $500 \text{ m}^2/\text{ha}$  bzgl. der Wohnflächendichte. Die Visualisierung der Wahrscheinlichkeit in drei Dimensionen ist wenig übersichtlich, weshalb in Abbildung 4-9 die absolute Häufigkeit je Gebäudetyp für die zwei Dimensionen Bruttogrundfläche und Höhe dargestellt ist. Dabei wurde links die Höhe aus LoD 2- sowie rechts aus Sentinel-Daten herangezogen. Wie oben beschrieben entstammt die Bruttogrundfläche jeweils OSM-Daten.

Je Zelle in den drei Dimensionen wird das Verhältnis aus relativer Häufigkeit je Gebäudetyp und Summe aller Häufigkeiten über die Gebäudetypen hinweg berechnet. Dies bildet die Wahrscheinlichkeit eines Gebäudetyps für die entsprechende Zelle ab. Die Verteilung der Gebäudetypen im Kalibrierungsdatensatz spiegelt nicht das tatsächliche Verhältnis der Gebäudetypen in Deutschland wider, weshalb die berechnete Wahrscheinlichkeit zusätzlich gewichtet wird, um eine überproportionale Erfassung einer Klasse zu vermeiden. Die Gewichtung erfolgt anhand der relativen Häufigkeit der Gebäudetypen in Deutschland nach [85] abzüglich der bereits klassifizierten, großen Mehrfamilienhäuser (siehe regelbasierte Klassifikation). Zur Quantifikation der bereits klassifizierten Mehrfamilienhäuser musste für nicht unterteilte Gebäudekomplexe ein Ansatz entwickelt werden, um die Anzahl der Gebäude je Komplex abzuschätzen. Zu diesem Zweck wurden unterteilte Gebäudekomplexe des Referenzdatensatzes hinsichtlich ihrer Fläche je Gebäude analysiert, um anschließend die Anzahl an Gebäuden in nicht unterteilten Gebäudekomplexen zu approximieren. Auf diese Weise erfolgte die Gewichtung der Wahrscheinlichkeiten. Das Ergebnis stellt eine Wahrscheinlichkeit je Gebäudetyp und Zelle entsprechend den Merkmalsausprägungen der drei Dimensionen dar. Die Klassifikation aller Gebäude, die diese Ausprägungen gemein haben, erfolgt daraufhin durch zufällige Sortierung und die Zuweisung eines Gebäudetyps, sodass die resultierende Verteilung der vorgegebenen Wahrscheinlichkeit des jeweiligen Gebäudetyps entspricht. Auf diese Weise konnten die vorhandenen Gebäudetypen klassifiziert werden, ohne eine definierte Grenze zwischen den Klassen zu ziehen. Weitere untersuchte Merkmale waren zu unspezifisch, um diese als Alternative zur zufälligen Verteilung heranzuziehen.

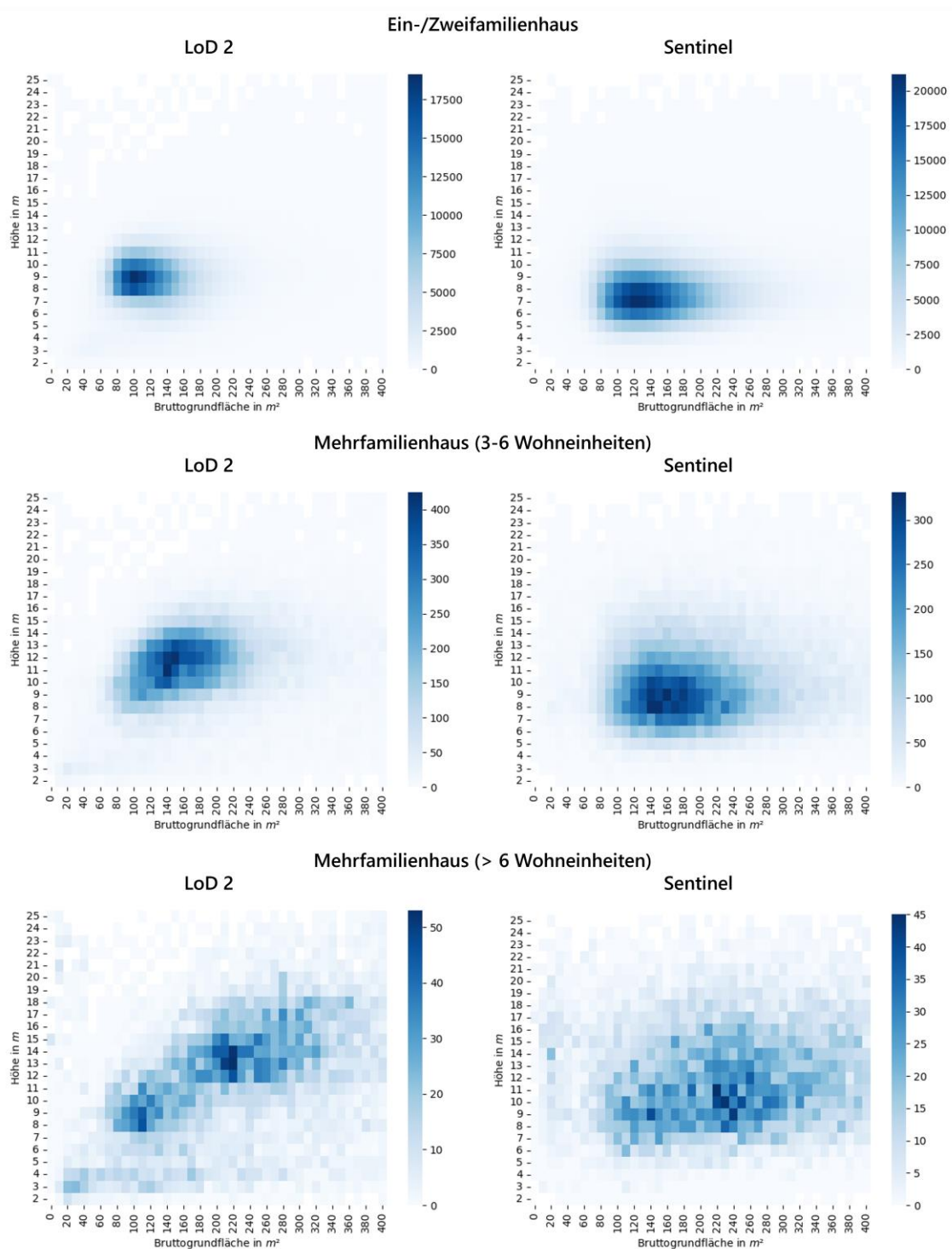


Abbildung 4-9: Absolute Häufigkeit nach Höhe und Bruttogrundfläche je Gebäudetyp und Datenquelle, Darstellung auf Basis von [82]

Für 0,4 Mio. Gebäude lag weder aus LoD 2- noch aus Sentinel-Daten eine Gebäudehöhe vor, weshalb für diese eine alternative Vorgehensweise gewählt wurde. Die Gebäudetypklassifikation erfolgte auf Basis der Wahrscheinlichkeit nach den zwei Dimensionen Bruttogrundfläche und Wohnflächen-dichte (vgl. Abbildung 4-9). Da die Gebäudehöhe eine sehr relevante Eigenschaft darstellt, wurden hierbei lediglich Gebäude klassifiziert, welche eine Hausnummer besitzen. Dies limitierte die fehlerhafte Klassifikation von gereihten Gebäuden, welche in OSM nicht unterteilt sind.

## Validierung

Zur Überprüfung der Gebäudety-Klassifikation wird eine Validierung durchgeführt. Als Referenz wird einerseits ein manuell klassifizierter Datensatz auf Basis einer geschichteten Zufallsstichprobe (rund 2.300 Polygone verteilt auf Bundesländer und Siedlungsräume) und andererseits ein Referenzdatensatz nach [45] mit 428.000 Gebäuden (Beschreibung siehe oben) herangezogen. Abbildung 4-10 zeigt die Gegenüberstellung mit den Modellergebnissen. Dabei ist der Gebäudety nach Referenzdaten nach unten und die Anzahl an Gebäuden nach den im Modell zugewiesenen Klassen nach rechts aufgetragen. Stimmt der Gebäudety überein, ist dies hellgrün dargestellt.

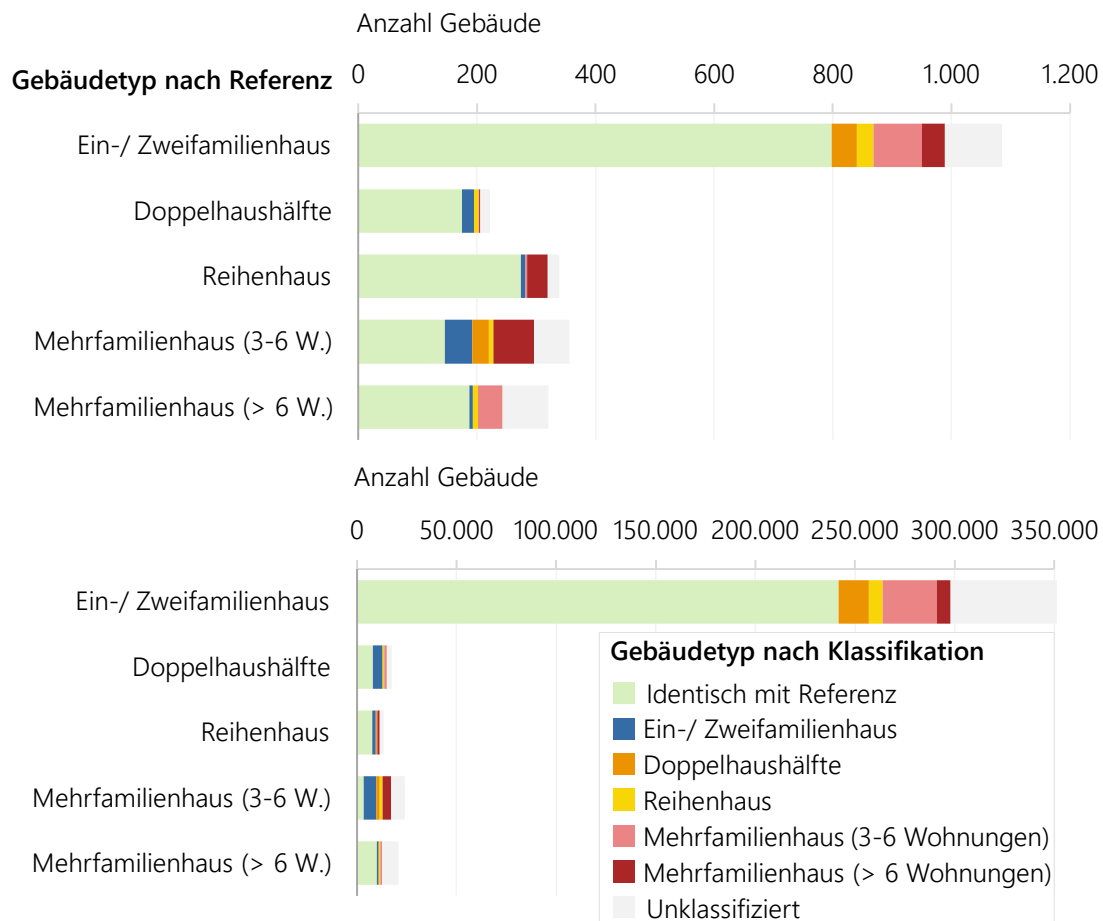


Abbildung 4-10: Validierung Gebäudety-Klassifikation mit manuell erhobenen Daten (oben) und Daten aus [45] (unten)

Der Gebäudety wird nachfolgend für die Ermittlung der Stockwerkszahl aus der Gebäudehöhe (Dachform) sowie die Zuweisung des spezifischen Wärmeenergiebedarfs in Kombination mit dem Baualter der Gebäude verwendet. Vor diesem Kontext ist die Fehlzuweisung von Gebäudetypen einzuordnen. Demnach ist eine Verwechslung von Ein-/Zweifamilienhäusern mit Doppel- oder Reihenhäusern weniger fehlerbehaftet als die Verwechslung mit Mehrfamilienhäusern. Die Identifikation von Doppelhäusern, Reihenhäusern und gereihten Mehrfamilienhäusern ist aufgrund der spezifischen Eigenschaften mit einer höheren Trefferwahrscheinlichkeit möglich. Freistehende Gebäude sind, wie bereits in der Modellentwicklung festgestellt, deutlich heterogener und überschneiden sich in ihren Merkmalsausprägungen. Die Verwechslung von Ein-/Zweifamilienhäusern, kleinen und großen Mehrfamilienhäusern fällt demnach höher aus. Die größten Abweichungen sind bei kleinen Mehrfamilienhäusern zu verzeichnen. Hierbei ist eine systematische Verwechslung mit großen Mehrfamilienhäusern festzustellen, da kleine, gereichte Mehrfamilienhäuser nur als freistehende Gebäude

angenommen werden. Wie im gesamten Gebäudebestand treten in den untersuchten Stichproben Ein-/ Zweifamilienhäuser mit Abstand am häufigsten auf. Im Referenzdatensatz nach [45] sind überproportional viele Ein-/ Zweifamilienhäuser enthalten, da diese öfter in homogener Bebauung vorkommen (siehe Beschreibung zu Referenzdatensatz oben). Eine manuelle Sichtung nicht klassifizierter Gebäude zeigte zudem, dass Gebäude mit atypischen Eigenschaften nicht durch den entwickelten Algorithmus adressiert werden. Trotz des Ausschlusses von Nichtwohngebäuden (vgl. Kapitel 4.2.1.1) sind diese vereinzelt in den Referenzzellen enthalten, wobei sie aufgrund ihrer abweichenden Eigenschaften meist unklassifiziert bleiben.

#### 4.2.2 Wohnfläche

Die Ermittlung der Wohnfläche erfolgt auf Basis der Gebäudegrundfläche, der Stockwerkszahl und dem Verhältnis von Wohnfläche zu Bruttogrundfläche.

$$Wohnfläche_i = Bruttogrundfläche_i * Stockwerkszahl_i * \frac{Wohnfläche_{GT}}{Bruttogrundfläche_{GT}} \quad (4-1)$$

$i$	Zählindex für Wohngebäude
$GT$	Gebäudetyp

Die Bruttogrundfläche der Gebäude wird auf Basis der Geometrie des Gebäudeumrisses aus [37] ermittelt. Eine Verwendung amtlicher Daten – für Gebiete in denen diese verfügbar sind – ist nicht direkt möglich, da Gebäude vielfach in mehrere Gebäudeteile unterteilt sind (vgl. Kapitel 4.1.4).

Die Abbildung der Stockwerkszahl und des Verhältnisses von Wohnfläche zu Bruttogrundfläche ist nachfolgend beschrieben.

##### 4.2.2.1 Stockwerkszahl

Die Stockwerkszahl wird anhand von Daten zur Gebäudehöhe abgeleitet. Zu diesem Zweck werden amtliche Daten und aus Satellitendaten abgeleitete Gebäudehöhen verwendet (vgl. Kapitel 4.1.3).

Aus amtlichen Daten (vgl. [38], [39], [40], [41], [42] und [43]) können Höheninformationen für 5,5 Mio. Wohngebäude herangezogen werden. Für weitere 12,1 Mio. als Wohngebäude identifizierte Polygone ist die aus Satellitendaten abgeleitete Höhe [44] vorhanden. Für die restlichen 0,4 Mio. Wohngebäude wird ein statistischer Ansatz gewählt.

#### Modell

Zur Ableitung der Stockwerkszahl aus der Gebäudehöhe wird ein Modell mit der Funktion nach Formel (4-2) angewendet.

$$Stockwerkszahl_i = \frac{(Gebäudehöhe_i - a_{GT})}{b_{GT}} \quad (4-2)$$

$i$	Zählindex für Wohngebäude
$a$	Funktionsparameter zur Beschreibung der Dachform
$b$	Funktionsparameter zur Beschreibung der Stockwerkshöhe
$GT$	Index des Gebäudetyps

Da die Stockwerkszahl zur Ermittlung der Wohnfläche eingesetzt wird, sind Gleitkommazahlen zur Approximation der Wohnfläche im Dachgeschoss gewollt. Zur Kalibrierung des Modells werden neben der Gebäudehöhe Daten zur Stockwerkszahl einer Stichprobe benötigt. Zu diesem Zweck

wird eine manuelle Erfassung von 2.185 Wohngebäuden vorgenommen. Diese werden mittels geschichteter Zufallsauswahl aus dem Referenzdatensatz [45] (siehe Kapitel 4.2.1.2) gezogen. Mittels Regressionsanalyse wird eine lineare Funktion je Gebäudetyp abgeleitet. Tabelle 4-3 zeigt die ermittelten Funktionsparameter für Formel (4-2), die Größe der Stichprobe sowie das Fehlermaß RMSE je Gebäudetyp.

Tabelle 4-3: Stockwerkszahl: Modellparameter, Stichprobe und Fehlermaß je Gebäudetyp

Gebäudetyp	a	b	n	RMSE
Ein-/ Zweifamilienhäuser	3,0	3,6	229	0,44
Doppelhäuser	2,4	3,4	99	0,40
Reihenhäuser	1,3	3,7	97	0,38
Mehrfamilienhäuser (3 bis 6 Wohneinheiten)	2,9	3,6	128	0,58
Mehrfamilienhäuser (>6 Wohneinheiten)	2,8	3,2	107	0,71

Die Bestimmung der Stockwerkszahl erfolgt in 3 Schritten: erst für Gebäude mit amtlichen Höhendaten, dann für Gebäude, die lediglich eine Höhe nach Sentinel-Daten aufweisen und im letzten Schritt für Gebäude, für die keine Höheninformation vorliegt.

### Schritt 1: Wohngebäude mit amtlichen Höhendaten

Für Gebäude mit amtlichen Höhendaten wird das Modell mit Formel (4-2) und den Parametern aus Tabelle 4-3 angewendet.

### Schritt 2: Wohngebäude mit aus Satellitendaten abgeleiteter Höhe

Die Genauigkeit der aus Satellitendaten abgeleiteten Gebäudehöhe ist geringer als die Werte amtlicher Daten. Dies zeigte ein Vergleich mit den LOD-Daten und manuelle Prüfungen. Aus diesem Grund wurden diese Daten lediglich als Indikator verwendet. Die Stockwerkszahl basiert in diesem Fall auf einer Auswertung des Referenzdatensatzes für die ein eindeutiger Gebäudetyp im Zensus-Raster und amtliche Höhendaten vorlagen. Abbildung 4-11 zeigt das Ergebnis der Anwendung des Stockwerkszahl-Modells auf diese 742.358 Wohngebäude.

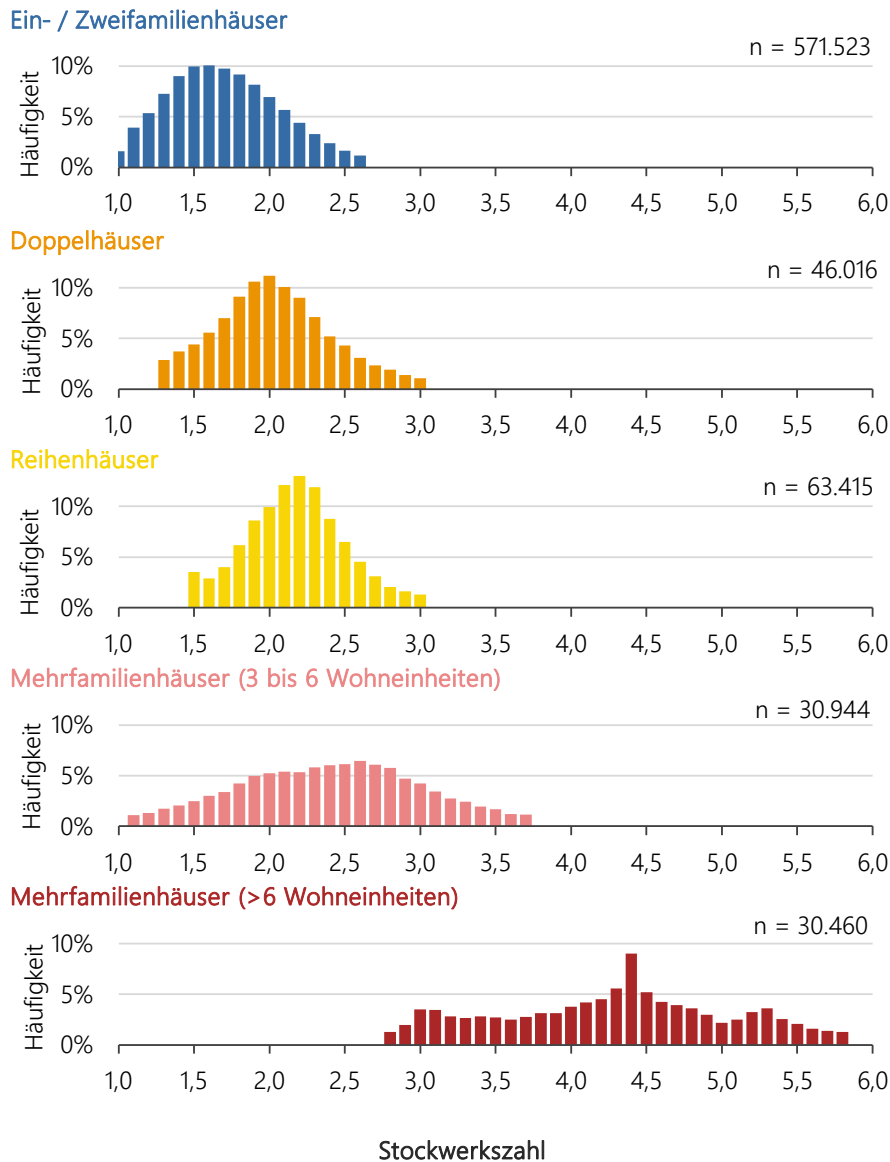


Abbildung 4-11: Stockwerkszahl je Gebäudetyp im Referenzdatensatz, eigene Darstellung auf Basis von [45], [38], [39], [40], [41], [42] und [43]

Wie zu erwarten, ist die Verteilung der Stockwerkszahl von Mehrfamilienhäusern deutlich breiter als die von Ein-/Zweifamilien-, Doppel- und Reihenhäusern. Die teilweise geringen Stockwerkzahlen der kleinen Mehrfamilienhäuser bestätigt, dass ein erkennbarer Teil dieser Gebäude fälschlicherweise als kleine Mehrfamilienhäuser klassifiziert wurden (vgl. Abbildung 4-10).

Die Übertragung der Stockwerkszahl auf die einzelnen Gebäude, welche lediglich eine Sentinel-Höhe aufweisen erfolgte folgendermaßen: Die Gebäude werden separat je Gebäudetyp nach Höhe sortiert und anschließend werden die Stockwerkzahlen entsprechend der Verteilung nach Abbildung 4-11 zugeordnet. Um keine ungewollte überregionale Verteilung der Werte zu erhalten, erfolgt dies je Postleitzahl.

### Schritt 3: Gebäude ohne Höheninformation

Für die rund 2 % der Wohngebäude, für die keine Höheninformation vorhanden ist, wird ebenfalls die Verteilung nach Abbildung 4-11 verwendet. Jedoch liegt kein Indikator für die Verteilung vor, weshalb diese zufällig erfolgt.



#### 4.2.2.2 Verhältnis Wohnfläche zu Bruttogrundfläche

Zur Berechnung der Wohnfläche wird neben der Bruttogrundfläche und der Stockwerkszahl das Verhältnis von Wohnfläche zu Bruttogrundfläche benötigt. Das Verhältnis dieser Größen bezieht sich auf ein Stockwerk und beschreibt wie viel des Fußabdrucks des Wohngebäudes (Bruttogrundfläche) Wohnfläche ist und nicht als Konstruktionsfläche (Wände) oder Verkehrsfläche (Treppenhäuser und Gänge bei Mehrfamilienhäusern) dient.

Abbildung 4-12 zeigt eine Auswertung von Literaturwerten nach [86] und [87].

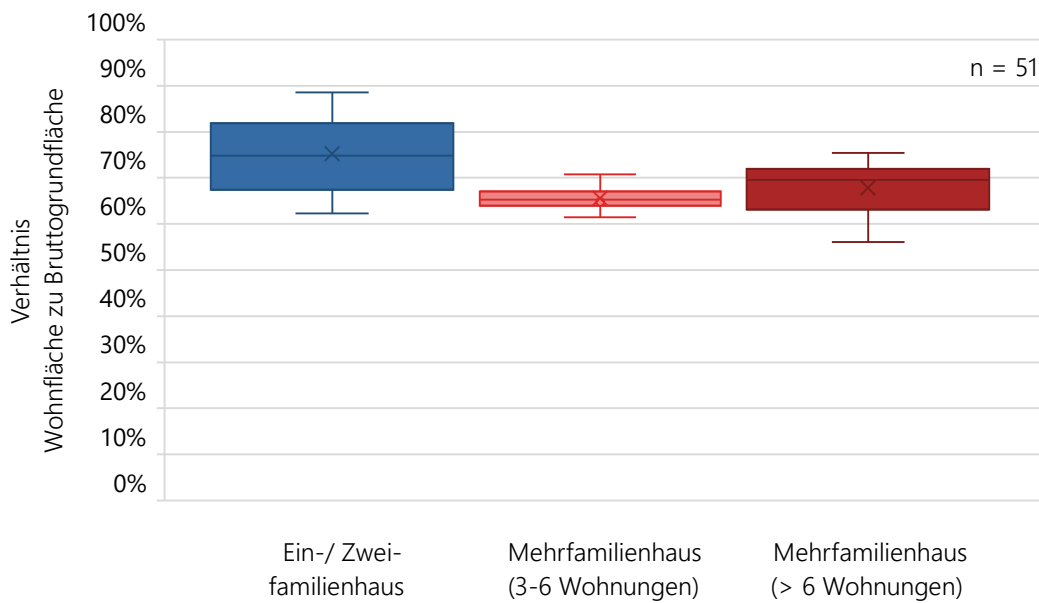


Abbildung 4-12: Verhältnis Wohnfläche zu Bruttogrundfläche, eigene Darstellung aus Daten von [86] und [87]

Eine Abhängigkeit zum Baualter war nur in marginalem Maß feststellbar, wobei die Schwankung deutlich höher als die Trendlinie war, weshalb dies nicht in die Modellierung einbezogen wurde. Im Vergleich zu anderen Parametern des Gebäude-Modells variieren die Werte in Abbildung 4-12 nur in geringem Maß. Aus diesem Grund wird je Kategorie allein der Mittelwert verwendet. Der Wert für EZFH in Höhe von 75,3 % wird ebenfalls für RH und DH angewendet. Für kleine MFH beträgt der Wert 65,6 % und für große MFH 67,8 %. In Mehrfamilienhäusern zählt die i. d. R. unbeheizte Verkehrsfläche wie Gänge und Treppenhäuser nicht zur Wohnfläche. Aus diesem Grund ist der Wert des analysierten Verhältnisses hier geringer als in der Klasse Ein-/Zweifamilienhaus.

#### 4.2.3 Spezifischer Wärmeenergiebedarf

Der spezifische Wärmeenergiebedarf (Definition siehe Kapitel 4.1.1) gibt an wie viel thermische Energie das Heizsystem für Raumwärme und Warmwasser je Quadratmeter Wohnfläche bereitstellt. Die Modellierung des spezifischen Wärmeenergiebedarfs erfolgt anhand von statistischen Werten je Baualter und Gebäudetyp (nachfolgender Abschnitt), Geodaten zum Baualter (vgl. Kapitel 4.2.3.1), unter Berücksichtigung des lokalen Klimas (siehe Kapitel 4.2.3.2) und mittels Kalibrierung anhand einer Statistik zu Energieverbrauchsausweisen (Kapitel 4.2.3.3).

##### Mittelwerte je Baualter und Gebäudetyp

In Bestandsgebäuden ist der energetische Anteil der Raumwärmebereitstellung deutlich größer als der der Trinkwarmwasserbereitstellung, weshalb der spezifische Wärmeenergiebedarf maßgeblich

von der energetischen Qualität der Gebäudehülle abhängt. Diese wiederum korreliert mit dem Baujahr, da die Anforderungen der entsprechenden Verordnungen stetig zugenommen haben. In [88] wurde auf Basis umfangreicher statistischer Auswertungen von Energieverbräuchen und Modellen der Endenergiebedarf für Raumwärme und Trinkwarmwasser je Baualter und Gebäudetyp angegeben.

Im Endenergieverbrauch sind Anlagennutzungsgrade berücksichtigt, die nach Energieträger (u. a. Gas, Öl, Fernwärme und Strom) und Technologie (Brennwertkessel, Heizwertkessel, Wärmepumpe etc.) differenziert sind. Für den nach bereitgestellter Nutzenergie gewichteten Technologiemix wird ein Nutzungsgrad (Nutzenergie zu Endenergie) von 94,0 % für die Raumwärme- und 71,5 % für die Trinkwarmwasserbereitstellung angegeben. In die Berechnung dieser Mittelwerte fließen für den Anlagennutzungsgrad sowohl Werte über 100 % (Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen) als auch Nutzungsgrade anderer Technologien, welche unter 100 % liegen ein. [88]

Die Werte aus [88] umfassen neben Anlagennutzungsgraden auch Verteilverluste, wobei letztere aufgrund der langen Verweildauer im Verteilsystem v. a. für die Bereitstellung von Trinkwarmwasser von hoher Relevanz sind. Diese Verteilverluste fallen – abgesehen von nachträglich dämmbaren Verteilungen in unbeheizten Räumen – auch nach dem Austausch des Wärmeerzeugers an. Der Vergleich mit Verteilsystemnutzungsgraden nach [67] und [89] lässt vermuten, dass die Rolle der Verteilverluste in den Werten von [88] dominiert. Der Einfluss des nach Technologiemix bewerteten Nutzungsgrads der Wärmeerzeuger auf die angegebenen Werte wird demnach als untergeordnet eingestuft und im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt, sodass die Werte als spezifischer Wärmeenergiebedarf verwendet werden. Hierzu werden die in [88] angegebenen Gebäudetypen den in dieser Arbeit verwendeten zugeordnet. Für das Doppel- und Reihenhaus werden die Werte des Zweifamilienhauses angesetzt. Für das große Mehrfamilienhaus werden die Werte der Kategorien „7 bis 12 Wohneinheiten“, „13 bis 20 Wohneinheiten“ und „mehr als 20 Wohneinheiten“ anhand von [47] mengengewichtet gemittelt. Im Ergebnis ergibt dies die in Abbildung 4-13 dargestellte Abhängigkeit von Gebäudetyp und Baujahr.

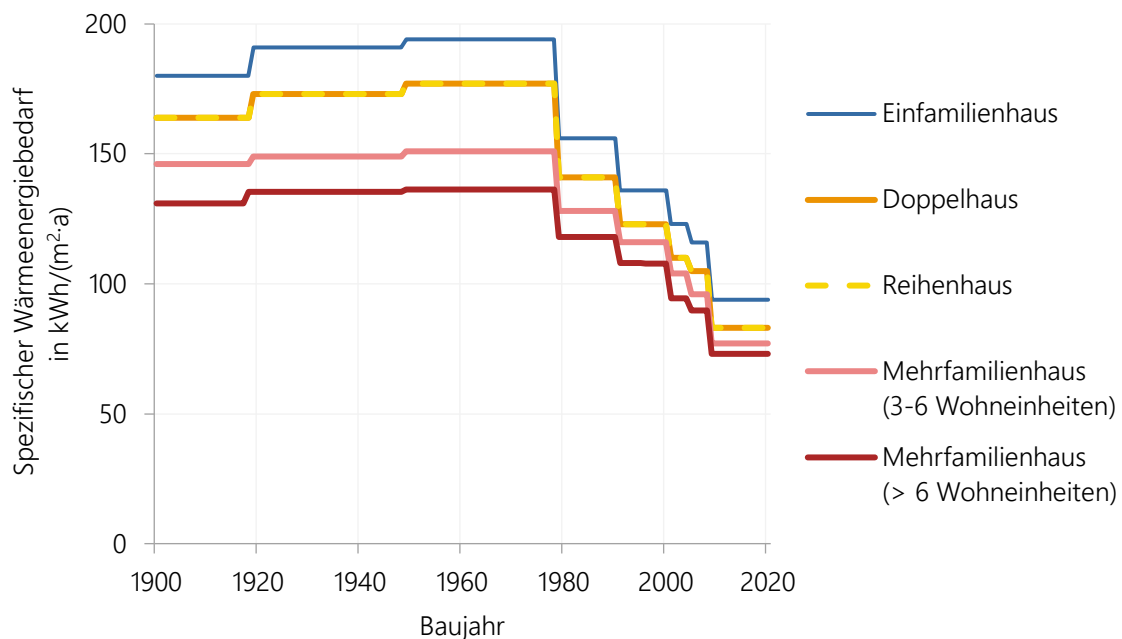


Abbildung 4-13: Mittlerer spezifischer Wärmeenergiebedarf je Gebäudetyp und Baualter, eigene Darstellung auf Basis von [88] und [47]

Anhand des Gebäudetyps (vgl. Kapitel 4.2.1.2) und des Baualters (siehe Kapitel 4.2.3.1) können die Werte aus Abbildung 4-13 den Wohngebäuden zugeordnet werden. Diese stellen Mittelwerte über den Gebäudetyp und die jeweilige Baualtersklasse dar. Damit repräsentieren sie einen Mittelwert bzgl. des energetischen Zustands, Nutzerverhaltens und Klimas in Deutschland. Um diese Heterogenität abzubilden, wird dieser Wert als Ausgangspunkt herangezogen, um einerseits anhand der Gradtagszahl den Einfluss des lokalen Klimas (vgl. Kapitel 4.2.3.2) zu berücksichtigen und andererseits Abweichungen bzgl. Sanierungsstand und Nutzerverhalten (vgl. Kapitel 4.2.3.3) darzustellen. Dabei wurden nach [59] bisher in erster Linie Dächer und Fenster, in weniger Fällen Außenwände und kaum Kellerdecken energetisch saniert (vgl. Abbildung 14-1 im Anhang). Die in Abbildung 4-13 dargestellten Daten beziehen sich auf das Jahr 2013 und sind witterungsbereinigt. Belastbare aktuellere Daten lagen nicht vor. Obgleich die Sanierungsrate seither gering ausfiel, ist eine graduelle Reduktion des mittleren spezifischen Wärmeenergiebedarfs hierdurch zu erwarten. Dies wird in der Kalibrierung (Kapitel 4.2.3.3) berücksichtigt.

#### 4.2.3.1 Baualtersklasse

Die Zuordnung des spezifischen Wärmeenergiebedarfs (vgl. Abbildung 4-13) zu Wohngebäuden erfolgt mittels Gebäudetyp und Baualter der Gebäude. Die Abbildung des Baualters im Gebäude-Modell ist im Folgenden beschrieben.

Das Baualter wird auf Basis der Rasterdaten nach [45] modelliert. In diesem Datensatz werden 10 Baualtersklassen (siehe Tabelle 14-1 im Anhang) in einer Auflösung von 100x100 m unterschieden. Diese Baualtersklassen eignen sich zur Zuweisung des spezifischen Wärmeenergiebedarfs je Gebäudetyp, da sich diese den Werten aus [88] zuordnen lassen (vgl. Abbildung 4-13). Für 16,1 der 18 Mio. als Wohngebäude klassifizierten Gebäude liegen Informationen zum Baualter nach [45] vor. Mit einer Auflösung von 100x100 m ist eine eindeutige Zuweisung des Baualters nicht in jedem Fall möglich. Für 5,6 Mio. bzw. 35 % dieser Gebäude ist in der entsprechenden Rasterzelle ein einheitliches Baualter hinterlegt. Hier erfolgt die Zuweisung fehlerfrei. In Zellen mit inhomogenem Baualter könnte eine gewichtete Mittelung oder eine zufällige Verteilung der entsprechenden spezifischen Wärmeenergiebedarfe erfolgen. Da der Fokus darauf liegt die Heterogenität des Gebäudebestands abzubilden, wurde eine zufällige Zuteilung vorgenommen. Um die Auswirkungen möglicher Fehlzugeordnungen einschätzen zu können, wird die Inhomogenität des Baualters bzw. des resultierenden spezifischen Wärmeenergiebedarfs untersucht. Hierzu wird je Rasterzelle der nach der Anzahl der Gebäude gemittelte Fehler des spezifischen Wärmeenergiebedarfs ausgewertet (vgl. Abbildung 4-14). Neben den 35 % der Gebäude mit homogenem Baualter nimmt mit zunehmender mittlerer Abweichung die relative Häufigkeit der Gebäude ab. Beispielweise weisen 30 % der Gebäude eine mittlere Abweichung von  $>0 - 10 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{-a})$  auf, während für lediglich 13 % eine mittlere Abweichung über  $20 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{-a})$  zu verzeichnen ist. Vor dem Hintergrund, dass durch Sanierung oder Nutzerverhalten größere Abweichungen möglich sind (vgl. Kapitel 4.2.3.3), ist die Auflösung der Rasterdaten von 100x100 m für diesen Anwendungsfall ausreichend. Für 1,9 Mio. der als Wohngebäude klassifizierten Gebäude ist keine Information zum Baualter in [45] hinterlegt, weshalb diesen der Mittelwert je Gebäudetyp zugewiesen wird.

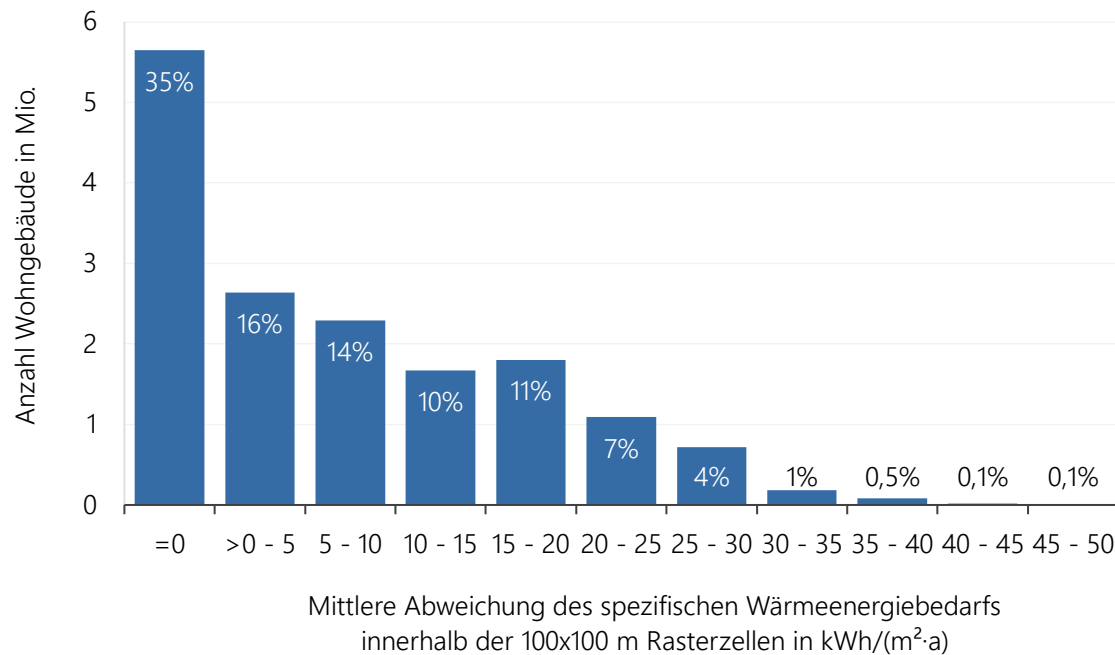


Abbildung 4-14: Homogenität des Baualters in 100x100 m Rasterzellen, eigene Darstellung auf Basis von [45] und [88]

Als Alternative zu [45] wurde auch die Verwendung der Rasterdaten aus [90] geprüft. Einerseits weisen diese eine höhere Auflösung von 30x30 m auf. Andererseits werden lediglich die vier Klassen „vor 1975“, „1975 – 1990“, „1990 – 2000“ und „2000 – 2014“ unterschieden, weshalb kein grundlegender Vorteil gegenüber dem verwendeten Datensatz besteht.

#### 4.2.3.2 Berücksichtigung des regionalen Klimas

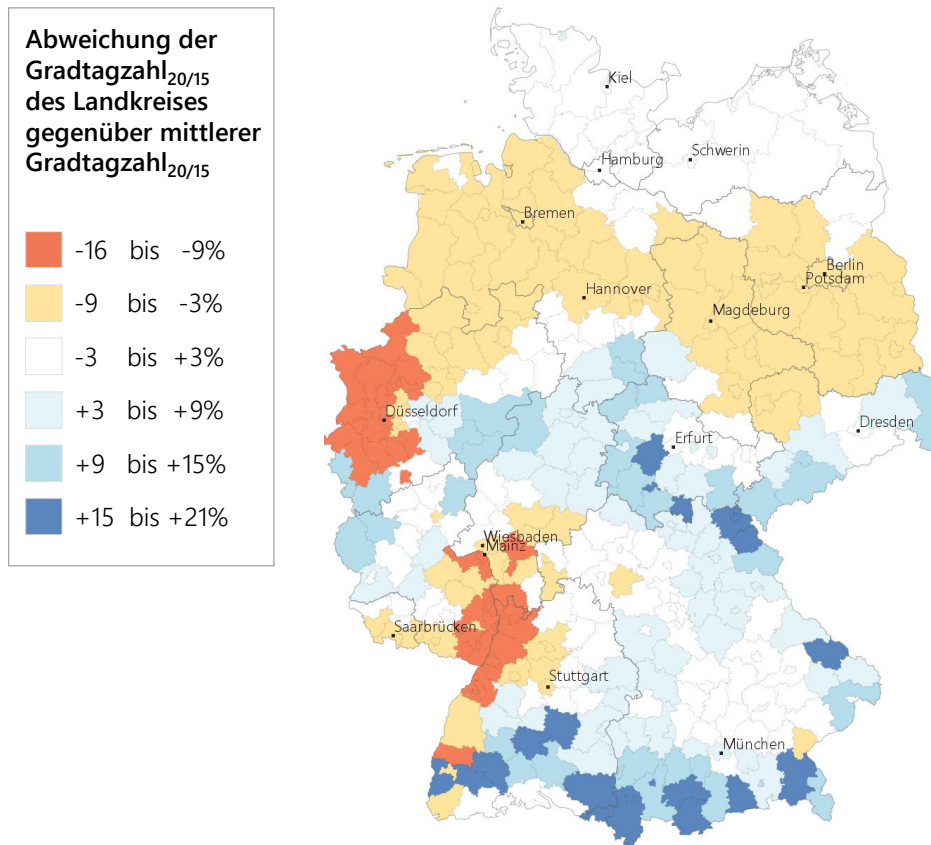
Durch die Verwendung von Werten aus [88] werden für den spezifischen Wärmeenergiebedarf deutschlandweite Mittelwerte angesetzt. Zur Berücksichtigung des Einflusses des lokalen Klimas auf die Raumwärmebereitstellung ist die Gradtagzahl ein geeigneter Parameter. Die Gradtagzahl wird je Landkreis mit einer angenommenen Heizgrenztemperatur von 15 °C und einer Raumtemperatur von 20 °C berechnet. Um eine für viele Gebäude relevante Außentemperatur heranzuziehen, wird als Bezugspunkt je Landkreis der geometrische Schwerpunkt der größten Stadt verwendet. Die Gradtagzahl wird als Mittelwert für die Jahre 2010 bis 2020 berechnet, wobei die Daten zur Außenlufttemperatur [91] entnommen wurden. Die nach Gebäudetyp und Baualter differenzierten Werte des spezifischen Wärmeenergiebedarfs (Anteil Raumwärme nach [88]) werden mit dem Verhältnis der Gradtagzahl des Landkreises zum deutschlandweiten Mittel multipliziert (vgl. Formel (4-3)).

$$SWB_{GT,BA,LKS} = SWB_{GT,BA} * \frac{GTZ_{LKS}}{GTZ} \quad (4-3)$$

<i>SWB</i>	Spezifischer Raumwärmeenergiebedarf
<i>GTZ</i>	Gradtagzahl
<i>GT</i>	Gebäudetyp
<i>BA</i>	Baualter
<i>LKS</i>	Landkreis

Abbildung 4-15 zeigt die relative Abweichung der Gradtagzahl des Landkreises gegenüber dem Mittelwert. Landkreise mit wärmerem Klima sind rot und die mit kälterem blau gekennzeichnet. Ent-

sprechend Formel (4-3) führt dies im Modell zu einer Reduktion (rot) oder Erhöhung (blau) des spezifischen Raumwärmeenergiebedarfs. Weniger geheizt werden muss demnach in Niedersachsen, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Teilen von Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Hessen und Baden-Württemberg. Ein überdurchschnittlicher Raumwärmeenergiebedarf wird für Teile Sachsens, Thüringens, Bayerns und Baden-Württembergs angesetzt. Besonders hoch ist dieser in der Nähe von Gebirgen.



Administrative Grenzen: © GeoBasis-DE / BKG-2017 | Generalisierung FfE

Abbildung 4-15: Abweichung der Gradtagzahl je Landkreis gegenüber Mittelwert, eigene Darstellung auf Basis von [91]

#### 4.2.3.3 Kalibrierung

Das Modell soll den Wohngebäudebestand in seiner Heterogenität repräsentieren. Durch die in Kapitel 4.2.3.2 beschriebene Methodik wird der Einfluss des lokalen Klimas auf den spezifischen Wärmeenergiebedarf abgebildet. Die Methodik zur Modellierung von Abweichungen vom mittleren Sanierungsstand bzw. Nutzerverhalten ist nachfolgend erläutert.

Der Vergleich des Modell-Zwischenergebnisses mit einer statistischen Auswertung umfassender Daten aus Energieverbrauchsausweisen nach [92] zeigt, dass der modellierte spezifische Wärmeenergiebedarf zu homogen ist bzw. zu steil verläuft (siehe Abbildung 4-16). Die Verteilung bezieht sich dabei jeweils auf die Wohnfläche aller Gebäude, wobei der Verlauf von [92] innerhalb der Energieeffizienzklassen linear interpoliert ist. Um für die Kalibrierung einen konsistenten Ansatz zu wählen, werden Anlagennutzungsgrade in [92] ebenfalls vernachlässigt. Damit die Verteilung der Modellergebnisse den Vergleichsdaten angenähert wird, wird eine Kalibrierung des Modells durchgeführt. Hierzu wird eine Verteilungsfunktion verwendet. Da hierfür keine dedizierten Daten zur Verfügung stehen und die Abweichung in Abbildung 4-16 symmetrisch erscheint, wird die Normalverteilung verwendet. Ausgehend vom mittleren Zustand bzw. Nutzerverhalten je Baualter unter

Berücksichtigung des Klimas wird Gebäuden zum Teil ein höherer spezifischer Wärmeenergiebedarf (unsaniert bzw. nicht sparsam) und teilweise niedrigere Werte (saniert bzw. sparsam) zugewiesen. Zielführend hat sich hierbei die Verwendung einer Standardabweichung ( $\sigma$ ) von  $45 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$  im Bereich von  $1,5 \sigma$  erwiesen. Da keine räumlichen Daten zur Zuordnung des Sanierungsstands oder des Nutzerverhaltens vorlagen, wurden diese Abweichungen zufällig auf die Wohngebäude verteilt. Damit dies nicht zu einer ungewollten großräumigen Umverteilung führt, wird dies je Postleitzahl durchgeführt. Um für die diskrete Anzahl an Gebäuden innerhalb einer Postleitzahl eine breite Verteilung der Werte zu ermöglichen, wird die Normalverteilung anhand von 7 Punkten diskretisiert. Das Ergebnis des Modells nach der Kalibrierung sowie die Referenz sind in Abbildung 4-16 dargestellt.

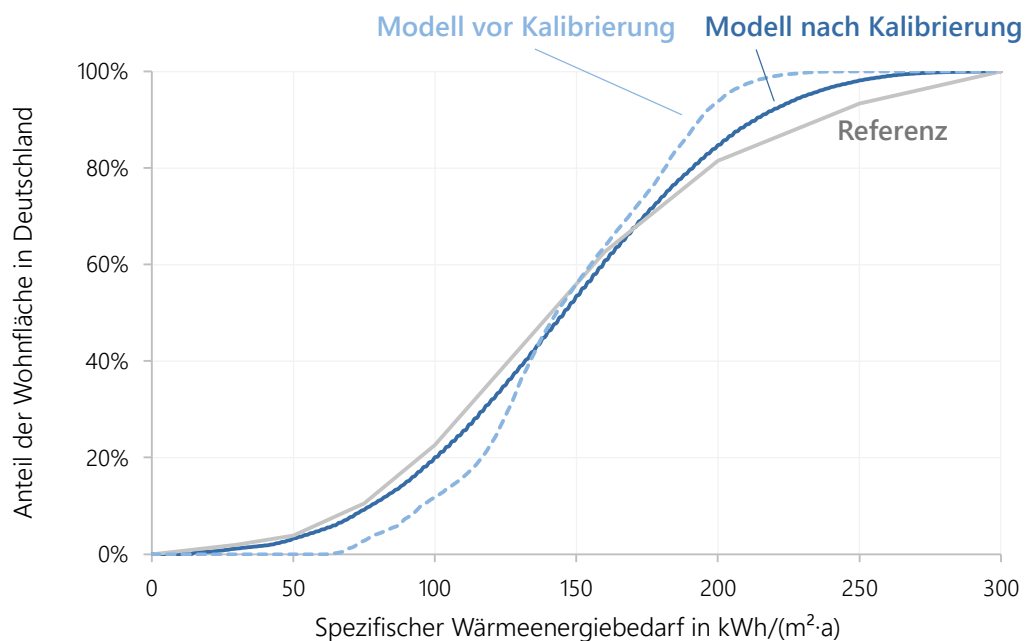


Abbildung 4-16: Verteilung des spezifischen Wärmeenergiebedarfs: Modellergebnis und Referenz, eigene Darstellung aus Daten von [92]

Die Daten aus [92] (wie auch [88]) sind nicht so aktuell wie die verwendeten Gebäudegrundrisse aus [37]. Aufgrund fortlaufender Dämmung des Gebäudebestands wird davon ausgegangen, dass der spezifische Wärmeenergiebedarf tendenziell rückläufig ist. Aus diesem Grund wird in der Kalibrierung keine vollständige Annäherung angestrebt. Es wird davon ausgegangen, dass v. a. sehr hohe Werte (oberhalb von  $200 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ) weniger häufig zutreffen, weshalb das Modell in diesem Bereich über der Referenz liegt.

### 4.3 Ergebnisse

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse des Gebäude-Modells zusammengefasst. Ziel der Modellierung ist die Abbildung des Wärmeenergiebedarfs je Gebäude, um darauf aufbauend das Potenzial von Wärmepumpen bestimmen zu können. Im Folgenden sind die Resultate zur Anzahl an Gebäuden, der Wohnfläche und des Wärmeenergiebedarfs dargestellt. Zur Überprüfung der Modellergebnisse wird eine Top-down-Validierung durchgeführt.

Zur Darstellung von statistischen Auswertungen werden im Rahmen dieser Arbeit Boxplots verwendet. Hierbei entspricht die linke Antenne dem 5. Perzentil, der linke Rand der Box dem 1. Quartil, der

mittlere Strich in der Box dem Median, der rechte Rand der Box dem 3. Quartil und die rechte Antenne dem 95. Perzentil.

### Anzahl Wohngebäude

Insgesamt werden mit der in Kapitel 4.2.1.2 beschriebenen Methodik 18,0 Mio. Gebäude als Wohngebäude erfasst. Nach [48] gab es im Jahr 2020 19,3 Mio. Wohngebäude. Diese Anzahl ist in [48] je Gemeinde differenziert in Gebäude mit einer, zwei oder drei und mehr Wohneinheiten. Für einen Vergleich mit den fünf in dieser Arbeit verwendeten Gebäudetypen wird die Anzahl aus dem Jahr 2011 nach [47] mittels [48] extrapoliert. Aufgrund unterschiedlicher Gebietsstände erfolgt dies je Landkreis, wobei die Anzahl an Gebäuden mit ein bis zwei bzw. mehr als drei Wohneinheiten als Mantelzahl für die entsprechenden Gebäudetypen verwendet wird. Das Verhältnis der Gebäudetypen innerhalb dieser Kategorien aus [47] wird je Landkreis konstant angenommen. Abbildung 4-17 zeigt den Vergleich von Modell und Referenz, wobei für letzteres die Zunahme seit 2011 dunkelgrau hervorgehoben ist.

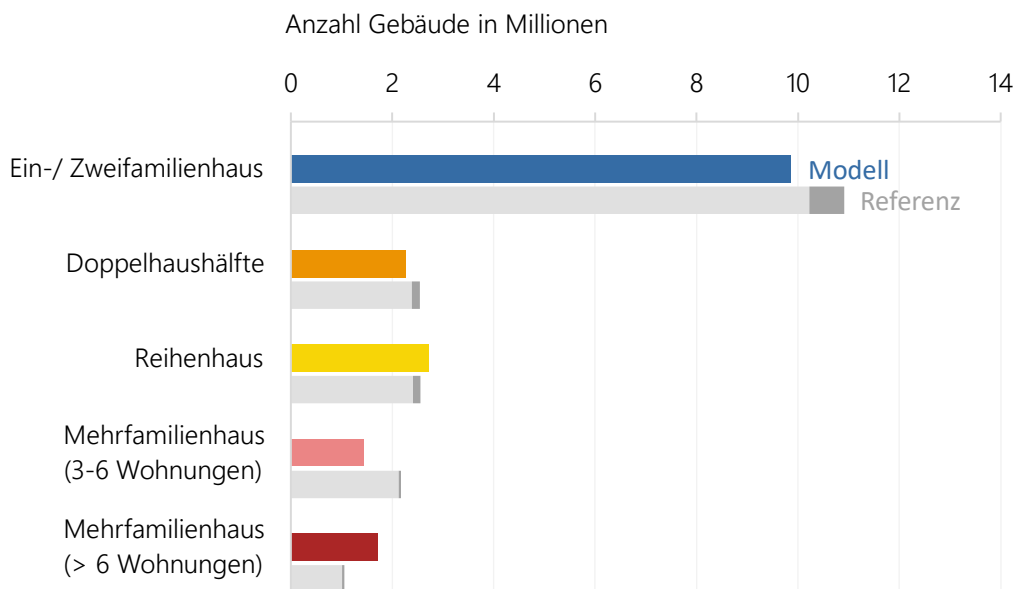
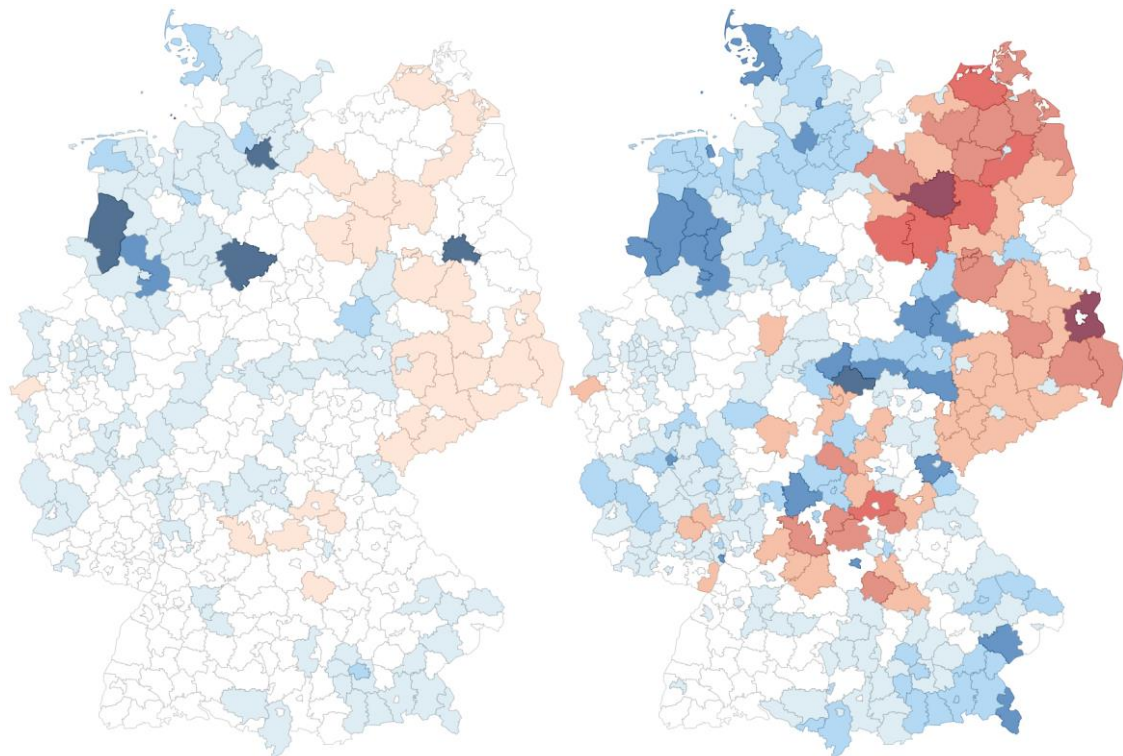


Abbildung 4-17: Anzahl Wohngebäude je Gebäudetyp – Modellergebnis und Referenz, eigene Darstellung mit Daten von [47] und [48]

Für Ein-/Zweifamilienhäuser werden rund 1,1 Mio. Gebäude bzw. knapp 10 % zu wenig erfasst. Die Werte von Doppelhäusern und Reihenhäusern liegen absolut gesehen näher an der Referenz. Während die Anzahl an Mehrfamilienhäuser mit drei bis sechs Wohnungen rund 0,7 Mio. zu gering ausfällt, sind in ähnlicher Höhe zu viele Gebäude als Mehrfamilienhäuser mit mehr als sechs Wohnungen erfasst. Hier ist eine systematische Verschiebung zwischen den Kategorien festzustellen, da kleine Mehrfamilienhäuser nur als freistehende Gebäude angenommen wurden (vgl. Kapitel 4.2.1.2). Aus energetischer Sicht ist dies unkritisch, da weder das Stockwerkszahl-Modell (vgl. Tabelle 4-3) noch der spezifische Wärmeenergiebedarf (vgl. Abbildung 4-13) wesentlich abweichen.

Weiter wird anhand von [48] die Abweichung der Anzahl an Wohngebäuden hinsichtlich ihrer räumlichen Verteilung untersucht (vgl. Abbildung 4-18).



Administrative Grenzen: © GeoBasis-DE / BKG-2017 | Generalisierung FfE

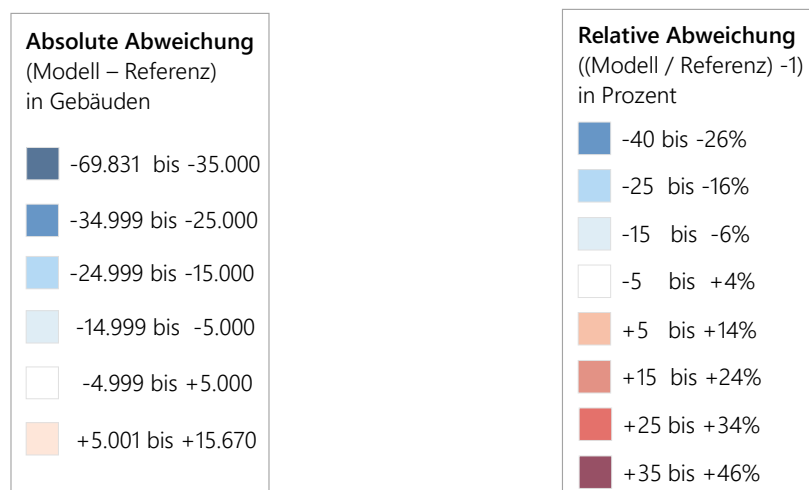


Abbildung 4-18: Abweichung Anzahl Wohngebäude je Landkreis: Vergleich von Modell und Referenz, eigene Darstellung auf Basis von [48]

In Abbildung 4-18 ist die absolute Abweichung (links) und relative Abweichung (rechts) der Anzahl an Wohngebäuden je Landkreis dargestellt. Blau stellt eine Untererfassung- und rot eine Übererfassung dar. Eine Untererfassung tritt auf, wenn Wohngebäude nicht im Datensatz enthalten sind oder nicht als solche identifiziert werden. Auch wenn die Abdeckung in ländlichen Gegenden bereits zugenommen hat (vgl. Abbildung 4-3), waren in [37] noch Gebiete mit sehr geringer Abdeckung zu verzeichnen. In Abbildung 4-18 weisen diese Landkreise hohe negative Werte sowohl nach absoluter als auch nach relativer Abweichung auf. Dies trifft überwiegend auf ländlich geprägte Gebiete zu. Eine Übererfassung hingegen deutet darauf hin, dass in diesen Gebieten Nichtwohngebäude wie Gewerbe oder Nebengebäude in relevantem Maß als Wohngebäude klassifiziert werden. Im Maximum sind dies 15.670 Gebäude zu viel im Kreis Spree-Neiße.



## Wohnfläche

Die Modellierung der Wohnfläche erfolgt nach dem in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Vorgehen. Abbildung 4-19 zeigt das entsprechende Ergebnis, wobei die Klassen Ein-/ Zweifamilienhaus, Doppelhaus und Reihenhaus für den Vergleich mit [48] aggregiert sind.

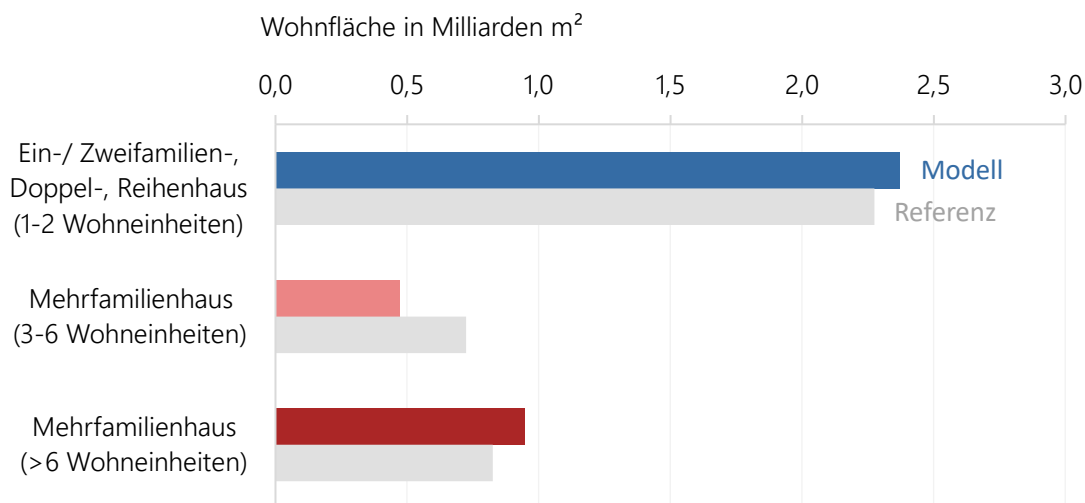


Abbildung 4-19: Wohnfläche je Gebäudetyp – Modellergebnis und Validierung, eigene Darstellung mit Daten von [48]

Sowohl im Modell als auch der Referenz (vgl. [48]) sind in Summe 3,8 Mrd. m<sup>2</sup> Wohnfläche zu verzeichnen. Dabei überschätzt das Modell die Wohnfläche von Gebäuden mit ein bis zwei Wohneinheiten um rund 4 % gegenüber der Referenz. Trotz der zu geringen Anzahl v. a. von Ein-/ Zweifamilienhäusern (vgl. Abbildung 4-17) wird keine Rekalibrierung der Wohnfläche daraus abgeleitet. Stattdessen wird davon ausgegangen, dass eine leichte Überschreitung der Werte aus der Statistik auch auf nachträgliche Dachausbauten o. ä. zurückzuführen ist.

Analog zur Anzahl an Gebäuden kommt es bei Mehrfamilienhäusern auch bezüglich der Wohnfläche im Modell zu systemischen Verschiebungen zwischen kleinen und großen Mehrfamilienhäusern (vgl. Abbildung 4-17).

## Wärmeenergiebedarf je Gebäudetyp

Das Endergebnis des Gebäude-Modells ist der Wärmeenergiebedarf je Gebäude. In Abbildung 4-20 ist der Wärmeenergiebedarf in drei Kategorien aggregiert, für die ebenfalls Wärmeenergiebedarfe nach [59] vorliegen. Da es sich bei den Werten aus [59] ebenfalls um Modellergebnisse handelt, erfolgt der Vergleich ausschließlich zum Zweck der Plausibilisierung und nicht zur Kalibrierung. Abbildung 4-20 zeigt deutlich, dass der überwiegende Teil des Wärmeenergiebedarfs Gebäuden mit ein bis zwei Wohneinheiten zuzuordnen ist. Hinsichtlich der konkreten Höhe unterscheiden sich die Modelle in dieser Kategorie um 70 TWh/a. Dies ist zum einen auf die höhere Wohnfläche (vgl. Abbildung 4-19) als auch Abweichungen im spezifischen Wärmeenergiebedarf zurückzuführen. Aufgrund der hohen Anzahl an Gebäuden weisen diese Gebäudetypen eine hohe Relevanz für die Potenzialermittlung auf. Als konservativer Ansatz wird eine mögliche Überschätzung des Wärmeenergiebedarfs einer Unterschätzung vorgezogen. Die Werte der Mehrfamilienhäuser weichen ebenfalls von der Referenz ab, wobei dies in Hinblick auf die Verschiebungen der Anzahl an Gebäuden und der Wohnfläche in diesen Klassen plausibel erscheint.

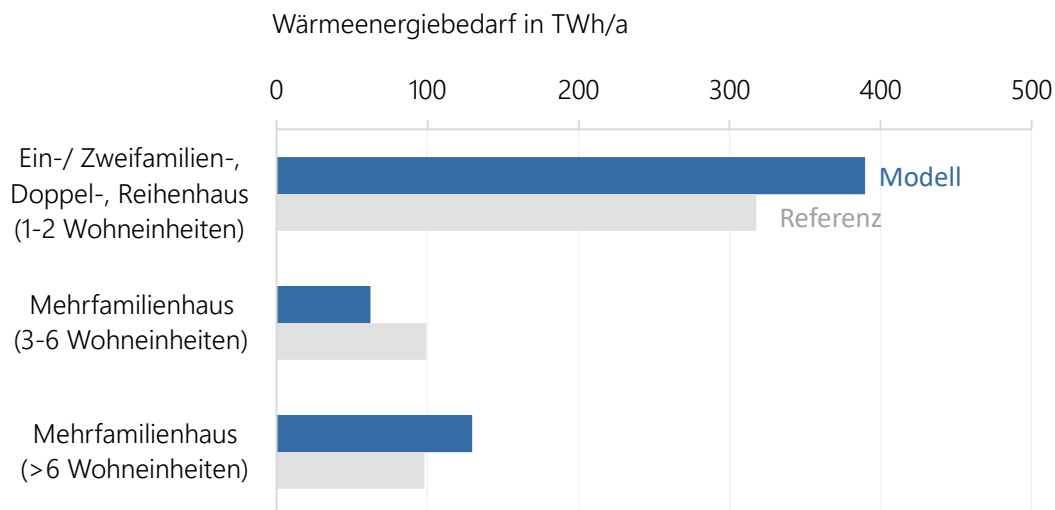


Abbildung 4-20: Wärmeenergiebedarf je Gebäudetyp – Modellergebnis und Validierung, eigene Darstellung aus Daten von [59]

#### Ausschluss von nicht unterteilten Gebäudekomplexen

Wie bereits in Kapitel 4.2.1.2 beschrieben ist ein Teil der Gebäudekomplexe in [37] nicht in einzelne Gebäude unterteilt. Auf Basis dieser Daten kann das Potenzial je Gebäude nicht ermittelt werden, da einzuhaltende Abstände für Schallschutz oder zur Erschließung von Erdwärme im Modell nicht abgebildet werden können. Da so keine Bewertung dezentraler Wärmepumpen möglich ist, werden ab hier rund 240.000 als nicht unterteilt identifizierte Gebäudekomplexe von weiteren Analysen ausgeschlossen. Die Erkennung erfolgt anhand der Anzahl an Hausnummern. Die Menge der darin enthaltenen Gebäude wird auf rund 0,9 Mio. geschätzt. Die nachfolgenden Untersuchungen beziehen sich demnach auf 17,1 Mio. Gebäude. Um den Anteil der verschiedenen Gebäudetypen auf das Ergebnis darzustellen, sind in die resultierende Anzahl an Gebäuden sowie der Wärmeenergiebedarf je Gebäudetyp in Abbildung 4-21 als gestapelte Balken dargestellt.

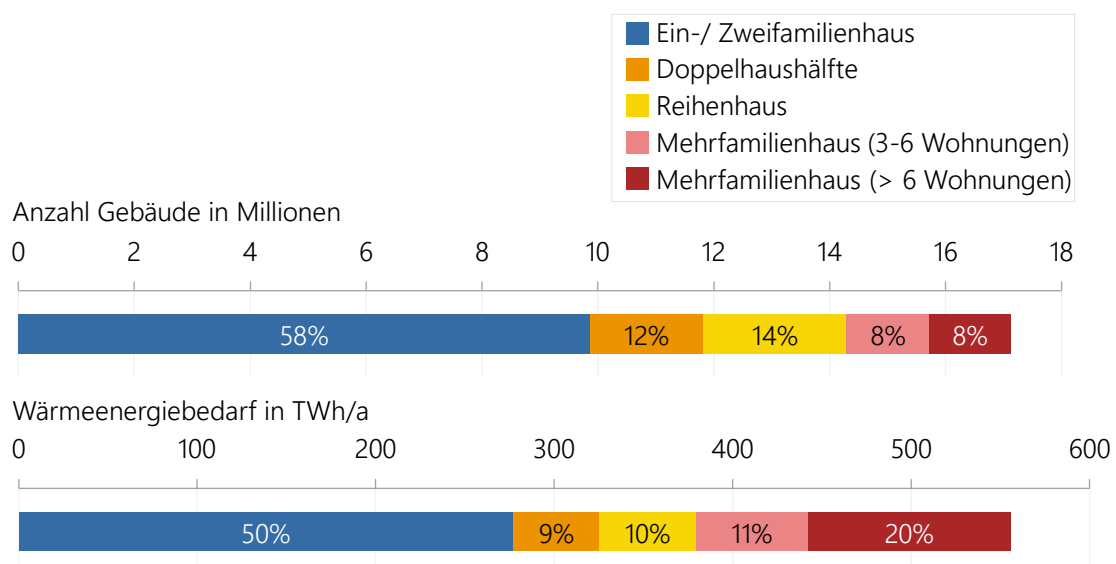


Abbildung 4-21: Zusammensetzung der 17,1 Mio. analysierten Gebäude der Potenzialanalyse

Ein-/ Zweifamilienhäuser stellen sowohl nach der Anzahl der Gebäude (58 %) als auch nach dem Wärmeenergiebedarf (50 %) den größten Anteil dar. Nach der Anzahl folgen Reihen- und Doppelhäuser sowie kleine und große Mehrfamilienhäuser. Damit liegt die Zusammensetzung der 17,1 Mio.

analysierten Gebäude sehr nahe an der Verteilung aller 19,3 Mio. Wohngebäude. Einzige Ausnahme stellt die oben beschriebene Verschiebung zwischen kleinen und großen Mehrfamilienhäusern dar. Nach der Referenz (vgl. Abbildung 4-8) sind 11 % der Wohngebäude kleine Mehrfamilienhäuser und 5 % große Mehrfamilienhäuser. Für die Ergebnisinterpretation ist zu beachten, dass kleine Mehrfamilienhäuser lediglich freistehend angenommen wurden und gereifte kleine Mehrfamilienhäuser deshalb mit in der Kategorie große Mehrfamilienhäuser erfasst wurden.

Die Aufteilung nach Wärmeenergiebedarf zeigt ein leicht abgewandeltes Bild. Der höhere Wärmeenergiebedarf von Mehrfamilienhäusern führt zur Abnahme der Anteile der restlichen Gebäudetypen. Um diese Unterschiede herauszustellen, wird neben dem Anteil der mit Wärmepumpen versorgbaren Gebäude auch der bereitstellbare Wärmeenergiebedarf dargestellt (vgl. Kapitel 6.3.2, 7.3.2 und 8.3.2).

### Wärmeenergiebedarf je Gebäudetyp

Die Potenzialanalyse basiert auf dem Vergleich des Wärmeenergiebedarfs der Gebäude mit dem Angebot an Wärmeenergie der untersuchten Wärmequellen. Zur Interpretation der Ergebnisse ist in Abbildung 4-22 der Wärmeenergiebedarf je Gebäudetyp statistisch ausgewertet. Die Abszisse ist dabei so skaliert, dass eine direkte Gegenüberstellung mit dem Angebot je Wärmequelle (vgl. Abbildung 6-17, Abbildung 7-15 und Abbildung 8-8) möglich ist.

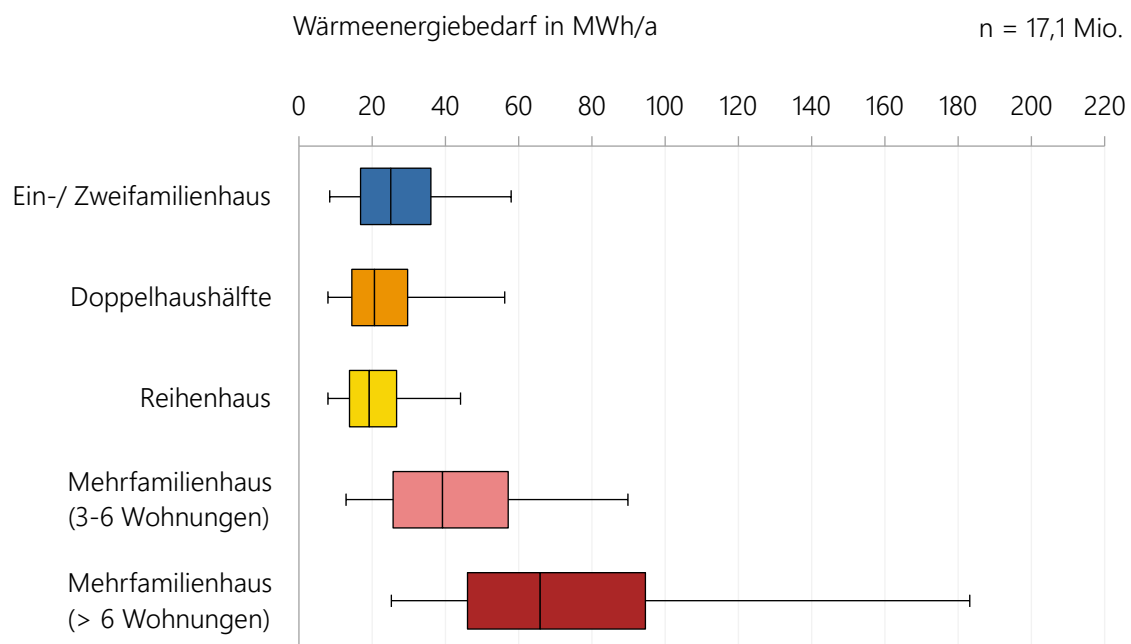


Abbildung 4-22: Wärmeenergiebedarf je Gebäudetyp

Aufgrund einzelner Ausreißer nach rechts (siehe rechte Antenne) wird nicht der Mittelwert, sondern der Median zur Interpretation der Ergebnisse herangezogen. Demnach weisen Ein-/Zweifamilienhäuser einen Wert von 25 MWh/a, Doppelhäuser 21 MWh/a, Reihenhäuser 19 MWh/a, kleine Mehrfamilienhäuser 39 MWh/a und große Mehrfamilienhäuser 66 MWh/a auf. Dabei ist erkennbar, dass ein höherer Median auch mit einem höheren Interquartilsabstand bzw. einer größeren Varianz des Wärmeenergiebedarfs einhergeht. Die rechte Antenne zeigt zudem, dass die Werte in wenigen Fällen auch deutlich höher als der Median ausfallen.

### Anzahl Wohngebäude in Abhängigkeit des spezifischen Wärmeenergiebedarfs

Neben dem Gebäudetyp wird zur Interpretation der Ergebnisse der Potenzialanalyse auch der spezifische Wärmeenergiebedarf ausgewertet. Abbildung 4-23 zeigt die Anzahl der Gebäude im Modell je nach spezifischem Wärmeenergiebedarf in Intervallen von 50 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Werte oberhalb von 300 kWh/(m<sup>2</sup>·a) treten im Modell sehr selten auf und werden deshalb vernachlässigt.

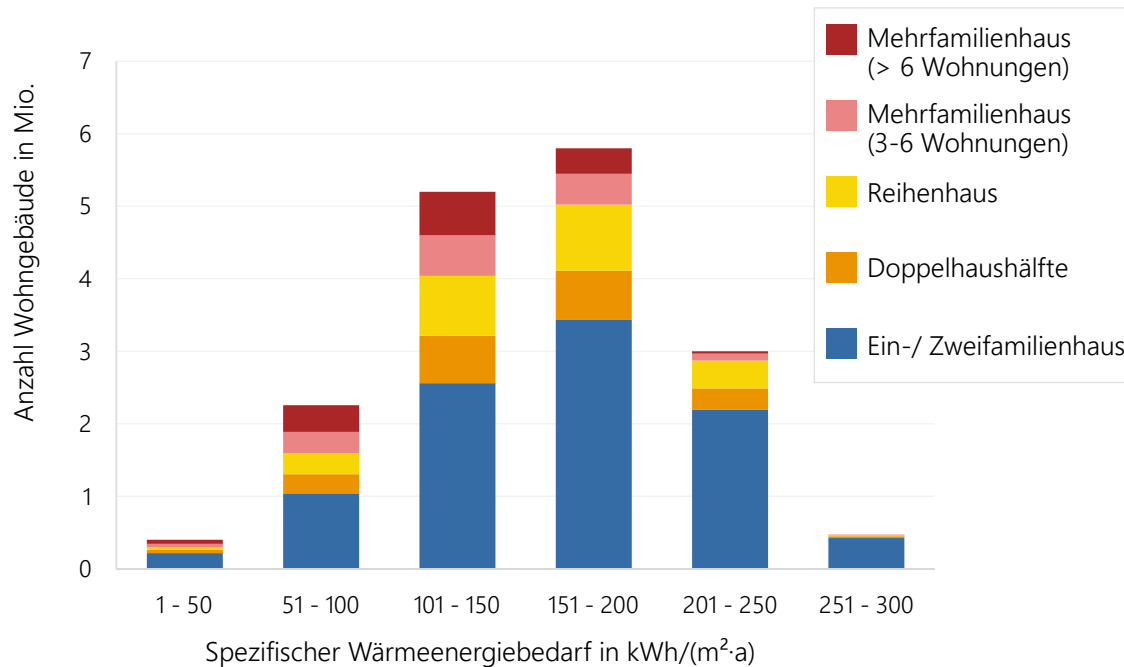


Abbildung 4-23: Anzahl Gebäude nach spezifischem Wärmeenergiebedarf

64 % der Gebäude weisen Werte zwischen 101 und 200 kWh/(m<sup>2</sup>·a) auf. Werte bis 100 kWh/(m<sup>2</sup>·a) treffen hingegen nur auf 16 % und Werte über 200 kWh/(m<sup>2</sup>·a) auf 20 % der Gebäude zu. Spezifische Wärmeenergiebedarfe bis 50 kWh/(m<sup>2</sup>·a) oder über 250 kWh/(m<sup>2</sup>·a) treten dabei mit zwei bzw. drei Prozent selten auf. Ein-/Zweifamilienhäuser weisen aufgrund Ihrer Charakteristik (vgl. Abbildung 4-13) tendenziell höhere Werte als Mehrfamilienhäuser auf.

## 4.4 Zwischenfazit

Das entwickelte Modell bildet den Wärmeenergiebedarf für 17,1 Mio. identifizierte Wohngebäude ab. Das Ergebnis basiert im Wesentlichen auf der Grundfläche, der Höhe und dem spezifischen Wärmeenergiebedarf der einzelnen Gebäude, wobei zur Abbildung verschiedene Datenquellen und Methoden zum Einsatz kommen. Die Grundfläche wird aus OpenStreetMap herangezogen und dient als Eingangsgröße für die Klassifikation des Gebäudetyps und als Basis zur Ermittlung der Wohnfläche. Die Gebäudetyp-Klassifikation erfolgt zweistufig, wobei gereichte Gebäude mittels diskreter Schwellenwerte und freistehende Gebäude anhand der Wahrscheinlichkeit zur Klassenzugehörigkeit differenziert werden. Die Höhe der Gebäude wird für 6 Bundesländer aus amtlichen Daten herangezogen. Für die weiteren Gebiete wird die aus Satellitendaten abgeleitete Höhe als Indikator für die Zuweisung der Stockwerkszahl verwendet. Die Modellierung des spezifischen Wärmeenergiebedarfs erfolgt auf Basis statistischer Mittelwerte je Gebäudetyp und Baualter und der anschließenden Berücksichtigung des regionalen Klimas. Weder zum energetischen Zustand der Gebäudehülle noch zum Nutzerverhalten sind räumlich aufgelöste Daten verfügbar, weshalb das Modell zur Abbildung der heterogenen Struktur des spezifischen Wärmeenergiebedarf mittels Verteilungsfunktion kalibriert wird. Als Referenz wird eine umfassende statistische Auswertung von Energieausweisen herangezogen. Nicht für alle Wohngebäude waren Daten verfügbar bzw. in ausreichender Qualität vorhanden. Im Modell konnten deshalb nicht alle der rund 19,3 Mio. Wohngebäude abgebildet werden, wobei die Verteilung der Gebäudetypen im Modell ähnlich der im gesamten Bestand ist. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass gereichte Mehrfamilienhäuser mit drei bis sechs Wohneinheiten im Modell als Gebäude mit mehr als sechs Wohneinheiten erfasst wurden, was eine Verschiebung zwischen diesen Kategorien zur Folge hat.

Zur Weiterentwicklung des Modells wurden folgende Möglichkeiten identifiziert: Die Fehlerfassung des Gebäudetyps stellt eine Unsicherheit des Gebäude-Modells dar. Dies ist jedoch auf die Heterogenität des Gebäudebestands zurückzuführen, weshalb auch mit alternativen Methoden zur Klassifizierung Fehlzuordnungen auftreten (vgl. [93] und [94]). Eine weitere Möglichkeit zur Optimierung des Modells besteht in der Verwendung weiterer amtlicher Daten zur Gebäudehöhe, welche aufgrund der höheren Genauigkeit der aus Satellitendaten abgeleiteten Höhe vorzuziehen sind. Es wird davon ausgegangen, dass weitere Bundesländer diese frei zugänglich machen, da diese bis Redaktionsschluss dieser Arbeit für drei weitere Bundesländer (Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Hessen) veröffentlicht wurden. Die weitere Optimierung zur Abbildung des spezifischen Wärmeenergiebedarfs ist ambivalent. Einerseits könnte das Baualter noch detaillierter abgebildet werden z. B. durch Hinzuziehen kürzlich erschienener Daten nach [95] in Gebieten mit inhomogenem Baualter. Andererseits bleibt für die einzelnen Gebäude der Sanierungszustand bzw. das Nutzerverhalten weiterhin unbekannt. Grundsätzlich kann auch die im Jahr 2022 gestartete Zensus-Befragung weitere Daten für das Gebäude-Modell liefern, insofern die Anliegen des Datenschutzes die Granularität der veröffentlichten Ergebnisse nicht zu stark beeinträchtigen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das Gebäudemodell den Wärmeenergiebedarf von 17,1 Mio. Gebäuden abbildet. Die Validierung zeigt, dass die Gesamtheit der Wohngebäude bzw. deren heterogene Struktur damit zielführend abgebildet wird. Zur Ermittlung des Wärmeenergiebedarfs einzelner Gebäude wurden Möglichkeiten zur Weiterentwicklung identifiziert. Für die systemische Bewertungen des Potenzials von Wärmepumpen mit dem Fokus auf das gesamte Bundesgebiet werden Verwechslungen in der Zuordnung von Werten zu einzelnen Gebäuden als unkritisch eingestuft, da systemische Fehler nicht erkennbar sind. Lediglich die Verschiebung von kleinen zu großen Mehrfamilienhäusern im Modell ist für die Interpretation der Ergebnisse zu beachten.

# 5 Anlagen-Modell

Ziel des Anlagen-Modells ist die Abbildung der Anlageneffizienz von Wärmepumpen in Abhängigkeit der Wärmequelle, des Standorts und des zu versorgenden Wohngebäudes. Die modellierte Effizienz wird für die Potenzialanalyse benötigt und in Kapitel 10.3 für die Quantifizierung des zukünftigen Strombedarfs von Wärmepumpen herangezogen. Vor diesem Hintergrund zielt die Modellierung nicht auf die Abbildung des Verhaltens einzelner Anlagen, sondern auf die Bestimmung eines mittleren Lastgangs, der die Summe vieler Anlagen repräsentiert, ab.

Zu Beginn sind in diesem Kapitel die Grundlagen der Effizienz von Wärmepumpen dargestellt (Kapitel 5.1), anschließend wird die Methodik zur Abbildung der Jahresarbeitszahl sowie der Heizlast erläutert (Kapitel 5.2), um daraufhin die Ergebnisse zu beschreiben (Kapitel 5.3) und ein Zwischenfazit zu ziehen (Kapitel 5.4).

## 5.1 Grundlagen

---

Im Folgenden sind relevante Grundlagen für die Effizienz von Wärmepumpen erläutert.

Zur Beschreibung der Effizienz von Wärmepumpen existieren zwei Parameter: die Leistungszahl und die Arbeitszahl. Die Leistungszahl beschreibt die Effizienz der Wärmepumpe zu einem spezifischen Zeitpunkt, die i. d. R. nach normierten Bedingungen ermittelt wird (vgl. [96]). Die Arbeitszahl hingegen gibt die Effizienz über einen bestimmten Zeitraum an, weshalb sie über ein Jahr gesehen Jahresarbeitszahl genannt wird und entweder berechnet oder gemessen werden kann (vgl. [97]).

### **Funktionsweise von Wärmepumpen**

Wärmepumpen nutzen einen linksläufigen Kreisprozess, bei dem Arbeit in Wärme umgesetzt wird. Konkret handelt es sich um den Kaltdampfprozess (Plank-Prozess), welcher den Phasenwechsel des Kältemittels in Abhängigkeit des Drucks nutzt. Die Hauptbestandteile von Wärmepumpen zur Nutzung dieses Prozesses sind Verdampfer, Verdichter, Kondensator und Drosselventil, welche durch einen geschlossenen Kältemittelkreis verbunden sind. Im Verdampfer nimmt das Kältemittel durch einen Wärmeübertrager Energie aus der Wärmequelle z. B. der Außenluft auf, wobei es verdampft und in den gasförmigen Zustand übergeht. Daraufhin wird im Verdichter durch mechanische Arbeit der Druck des Kältemittels und damit auch dessen Temperatur erhöht. Der Druck muss dabei ausreichend hoch sein, sodass die Kondensationstemperatur über der Rücklauftemperatur des Heizkreises liegt, um Wärme an diesen abzugeben. Je geringer die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke ist, desto weniger Arbeit muss durch den Verdichter verrichtet werden bzw. desto effizienter kann die Wärmepumpe arbeiten. Im Fall elektrischer Wärmepumpen verbraucht der Antrieb des Verdichters Strom. Im nächsten Schritt gelangt das Kältemittel weiter zum Kondensator, wo es mit einem Wärmeübertrager thermische Energie an den Heizkreis des Gebäudes abgibt, kondensiert und wieder in den flüssigen Zustand übergeht. Das Kältemittel strömt weiter zum Drosselventil, welches den Massenstrom so reguliert, dass der Kondensator und der Verdichter nicht trocken laufen oder überfüllt werden. Die resultierende Reduktion des Drucks führt zu einer Teilverdampfung und damit Abkühlung des Kältemittels unter die Wärmequellentemperatur und der Kreisprozess beginnt von vorne. Die Eigenschaften des Kältemittels müssen allgemeine Voraus-

setzungen wie chemische Beständigkeit, Werkstoffverträglichkeit o. ä. erfüllen und haben Auswirkungen auf die Anlagenkonstruktion (kompakte Bauweise, thermische Belastung von Verdichter bzw. Schmiermittel o. ä.), die Effizienz und das Treibhauspotenzial. Während in der Vergangenheit meist halogenierte Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe verwendet wurden, kommen aufgrund des vergleichsweise geringeren Treibhauspotenzials gegenwärtig Fluor-Kohlenwasserstoffe zum Einsatz. Entsprechend der Verordnung Nr. 517/2014 der europäischen Union (vgl. [98]) sollen die Emissionen fluorierter Treibhausgase reduziert werden, weshalb vermehrt natürliche Kältemittel zum Einsatz kommen, welche ein sehr geringes Treibhauspotenzial aufweisen (z. B. Propan (R290):  $\text{GWP}_{100} = 3 \text{ CO}_{2e}$ ) und bei Leckage oder Havarie kaum zum Treibhauseffekt beitragen. [68]

### Zusammenhang von Effizienz und Bedarf an Umweltwärme

Formel (5-1) beschreibt den Zusammenhang zwischen der Leistungszahl  $\varepsilon$  und dem Anteil an Umweltwärme (vgl. [68]):

$$\text{Anteil Umweltwärme} = \frac{\dot{Q}_U}{\dot{Q}_H} = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \quad , \quad \text{wobei } \varepsilon = \frac{\dot{Q}_H}{P_{el}} \quad (5-1)$$

$\dot{Q}_U$	Der Umwelt entzogene thermische Leistung
$\dot{Q}_H$	Heizleistung
$\varepsilon$	Leistungszahl
$P_{el}$	Elektrische Leistung

In Abbildung 5-1 ist dieser Zusammenhang grafisch dargestellt.

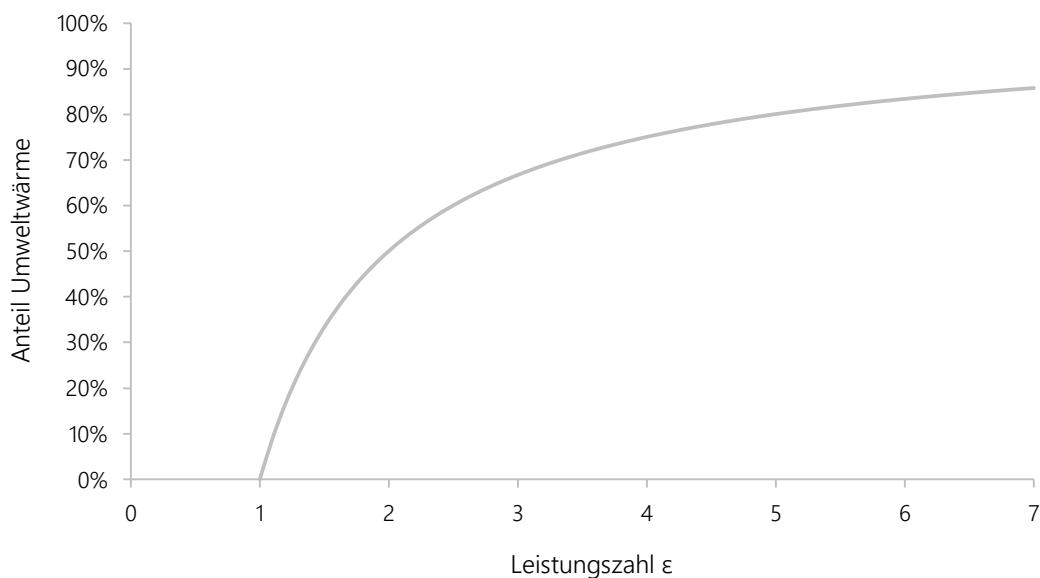


Abbildung 5-1: Anteil Umweltwärme zu Leistungszahl, eigene Darstellung nach [68]

Je höher die Leistungszahl, desto mehr Umweltwärme wird für die Wärmebereitstellung genutzt. Oder anders formuliert: Je effizienter die Wärmepumpe arbeitet, desto weniger Strom benötigt sie. Für die Potenzialanalyse bedeutet das, dass je höher die Effizienz von Wärmepumpen angesetzt wird, desto mehr Umweltwärme muss z. B. der Außenluft oder dem Erdreich entzogen werden. Dementsprechend führt eine optimistische Modellierung der Anlageneffizienz zu einer konservativen Einschätzung des Potenzials von Wärmepumpen. Abbildung 5-1 zeigt außerdem einen asymptotischen

Verlauf der Kurve, was verdeutlicht, dass der Einfluss der modellierten Effizienz sich nur in begrenztem Maß auf die Potenzialanalyse auswirkt.

### Bilanzgrenze Jahresarbeitszahl

In [65] sind mögliche Bilanzgrenzen der Jahresarbeitszahl beschrieben (vgl. Abbildung 5-2). Im Rahmen dieser Arbeit wird die Definition der Jahresarbeitszahl mit dem Bilanzraum 3 (AZ 3) verwendet. Somit wird der Stromverbrauch des elektrische Heizstabs und der der Abtauvorrichtung (bei Luftwärmepumpen) berücksichtigt. Zirkulationspumpen des Heizkreislaufes und Wärmeverluste durch Speicher hingegen werden aus der Bilanzierung ausgeschlossen, da diese auch für alternative Heizsysteme erforderlich sind.

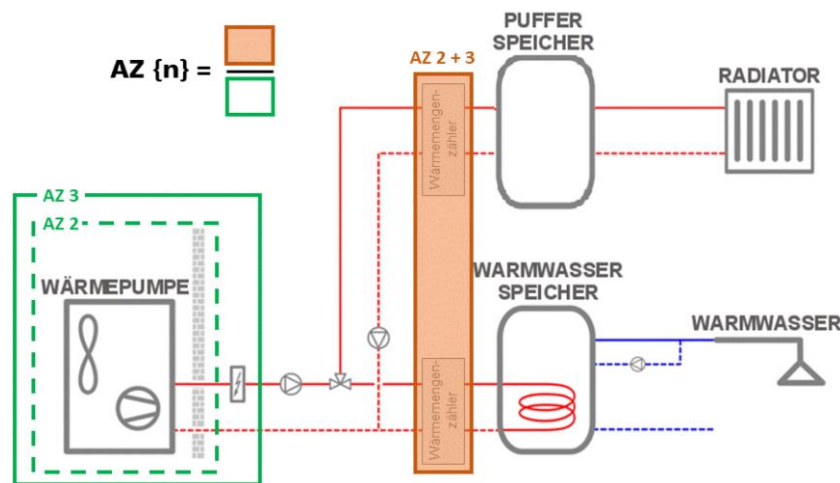


Abbildung 5-2: Bilanzgrenze Jahresarbeitszahl [65]

## 5.2 Methodik

Im Folgenden ist die Methodik zur Modellierung der Jahresarbeitszahl je Wärmequelle (Kapitel 5.2.1) sowie der Heizlast (Kapitel 5.2.2) beschrieben.

### 5.2.1 Jahresarbeitszahl

Die Jahresarbeitszahl wird einerseits für die Potenzialanalyse und andererseits in Kapitel 10 für die Ermittlung des zukünftigen Strombedarfs je nach Technologiezusammensetzung des Wärmepumpenbestands herangezogen. Die in diesem Kapitel beschriebene Methodik wurde bereits in [99], [59] und [100] veröffentlicht, weshalb der Fokus der nachfolgenden Beschreibung auf abweichenden Annahmen liegt.

Ziel der Modellierung ist es den Einfluss von Wärmequellen, des Klimas sowie verschiedener Gebäudetypen und Baualtersklassen zu berücksichtigen. Hierfür wird sowohl die Temperaturdifferenz von Wärmequelle und -senke als auch der Wärmeenergiebedarf zeitlich aufgelöst analysiert. Mit der Temperaturdifferenz werden theoretische Leistungszahlen berechnet, die anschließend anhand von Daten aus Feldtests nach [65] kalibriert werden, um realistische Leistungszahlen zu erhalten. In Kombination mit dem zeitlich aufgelösten Wärmeenergiebedarf für Raumwärme und Trinkwarmwasser wird die Jahresarbeitszahl je Wärmequelle, Landkreis, Gebäudetyp und Baualtersklasse ermittelt. Abbildung 5-3 zeigt den Zusammenhang dieser Parameter.



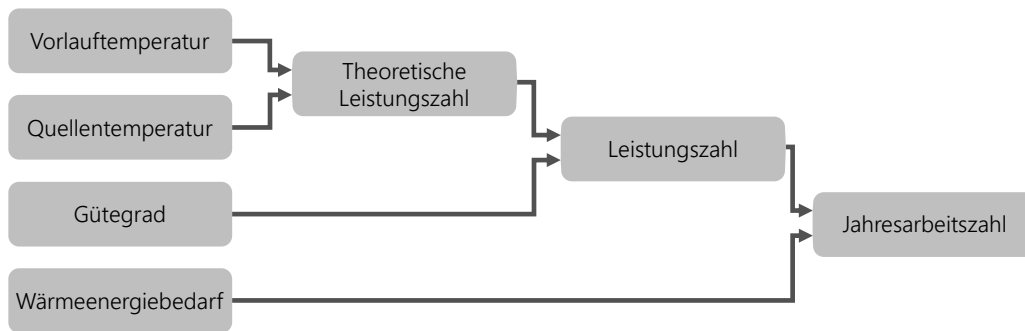


Abbildung 5-3: Methodik-Überblick Jahresarbeitszahl

Für Luftwärmepumpen werden – entsprechend dem Status Quo – bivalente parallele Anlagen mit elektrischem Heizstab zur Spitzenlastdeckung ab dem Bivalenzpunkt angenommen (vgl. Kapitel 6.2.4.1). Dabei wird angenommen, dass die Luftwärmepumpe am Auslegungspunkt 70 % der thermischen Leistung bereitstellt. Für die weiteren Wärmequellen wird für die Auslegung von einem monovalenten Betrieb ausgegangen, da elektrische Heizstäbe hier i. d. R. ausschließlich zur Absicherung z. B. zur Überbrückung von Wartungsarbeiten eingesetzt werden.

Nachfolgend ist die Modellierung der Jahresarbeitszahl auf Basis stündlicher Daten, die anschließende Kalibrierung sowie die Berücksichtigung des Wärmeenergiebedarfs zusammengefasst.

### Theoretische Jahresarbeitszahl

Die Effizienz von Wärmepumpen bestimmt sich maßgeblich aus der Temperaturdifferenz von Wärmequelle und -senke (vgl. Kapitel 5.1).

**Vorlauftemperatur:** Für die Beurteilung der Effizienz von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden ist die benötigte Vorlauftemperatur zur Raumwärmebereitstellung von hoher Relevanz. In [62] bzw. [59] wurde diese Vorlauftemperatur in Abhängigkeit des Baualters bzw. der energetischen Qualität der Gebäudehülle modelliert, wobei keine Maßnahmen zur Reduktion der Vorlauftemperatur unterstellt wurden. Diese Annahme führt bei einem spezifischem Raumwärmebedarf von beispielsweise 135 kWh/(m<sup>2</sup>a) bereits zu maximalen Vorlauftemperaturen von 75 °C, welche lediglich durch eine Hochtemperaturwärmepumpe bereitstellbar wären. Im Rahmen dieser Arbeit wird diesbezüglich eine abweichende Annahme getroffen: Aufgrund der hohen Relevanz der Vorlauftemperatur für die Effizienz von Wärmepumpen wird davon ausgegangen, dass in Bestandsgebäuden Maßnahmen zur Reduktion der Vorlauftemperatur wie der hydraulische Abgleich und der Austausch einzelner, zu gering dimensionierter Heizkörper erfolgen. Entsprechende Anreize setzt die umfassende Förderung dieser sogenannten Umfeldmaßnahmen (vgl. [101]), weshalb die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahmen i. d. R. gegeben ist (vgl. [100]). So wird angenommen, dass für die Raumwärmebereitstellung eine maximale Vorlauftemperatur von 55 °C mit vertretbarem Aufwand und bekannten Maßnahmen wie der Vergrößerung der Heizkörperfläche flächendeckend in Bestandsgebäuden realisierbar ist (vgl. [4], [60] und [17]). Die zeitliche Differenzierung erfolgt anhand der Heizkurve (vgl. [102]) sowie der stündlichen Außenlufttemperatur des Landkreises nach [91]. Alternativ könnten auch Niedertemperatursysteme mit etwa 35 °C Vorlauftemperatur durch Flächenheizungen oder spezielle Niedertemperaturheizkörper, die anhand eines integrierten Gebläses die Konvektion verstärken realisiert werden (vgl. [60]). Ob sich diese Technologien zukünftig im Bestand flächendeckend durchsetzen, ist derzeit nicht abschätzbar, weshalb diese nicht als Standard angenommen werden. Mögliche Einschränkungen, welche sich im Einzelfall durch das Wärmeverteilsystem ergeben, wie die Limitierung des Volumenstroms aufgrund des Durchmessers bestehender Rohre, Einrohrsysteme oder Etagen- bzw. Einzelraumheizungen können aufgrund mangelnder Daten in Rahmen diese Arbeit nicht berücksichtigt werden. Auch wenn diese im Modell nicht abgebildet sind, existieren für

diese Fälle technische Lösungen wie Hochtemperatursysteme oder Multisplitgeräte, die den Einsatz einer Wärmepumpe dennoch ermöglichen können.

Für die Bereitstellung von Trinkwarmwasser wird für Ein-/Zweifamilienhäuser, Doppelhäuser und Reihenhäuser eine Temperatur von 50 °C angenommen. Um die Hygieneanforderungen (vgl. [103] und [104]) auch in Mehrfamilienhäusern trotz langen Leitungen und vorhandenen Zirkulationsleitungen zu gewährleisten wird eine Temperatur von 60 °C angenommen. Die Systemtemperaturen für die Raumwärme- und Trinkwarmwasserbereitstellung werden mit dem stündlichen Wärmeenergiebedarf der Anwendungen je Gebäudetyp und Baualter gewichtet, um eine mittlere Vorlauftemperatur zu berechnen. Der Wärmeenergiebedarf wurde mit einem Gebäudesimulationsprogramm und 16 repräsentativen Typgebäuden (vier Gebäudetypen und jeweils vier Baualterklassen) ermittelt. Eine umfassende Beschreibung des stündlich aufgelösten Wärmeenergiebedarfs der 16 Typgebäude erfolgt in [59].

**Quellentemperatur:** Die Quelltemperatur entspricht im Fall der Luftwärmepumpe der Außenlufttemperatur. Diese wird [91] entnommen und je Landkreis differenziert (vgl. Kapitel 4.2.3.2).

Je nach Tiefe weist die Erdtemperatur eine mehr oder weniger saisonale Charakteristik auf. Im Bereich für Erdsonden ist diese annähernd konstant, während diese in wenigen Metern Tiefe (Erdkollektor) mehr variiert. Die Temperatur der im geschlossenen System zirkulierenden Sole wiederum hängt auch von den Verhältnissen im Untergrund wie der Wärmeleitfähigkeit ab. [68]

Daten zur Modellierung regionaler Unterschiede der Erd- bzw. Soletemperatur liegen nicht vor. Auf eine für alle Landkreise einheitliche, zeitliche Differenzierung der Soletemperatur auf Basis von Annahmen wird verzichtet, da der Einfluss auf die Jahresarbeitszahl aufgrund der im Vergleich zur Außenluft geringen Temperaturschwankung sowie der im Modell erfolgten Kalibrierung der Werte gering ist. Dementsprechend wird für Erdwärmepumpen eine konstante Soletemperatur in Höhe von 5 °C in Anlehnung an [65] angenommen.

In [105] wurde untersucht, wie sich die Effizienz von Solar/Eisspeicherwärmepumpen im Vergleich zu der von Luft- und Erdwärmepumpen verhält. Dabei wurden insgesamt 75 Simulationen mit verschiedenen Anlagenkonfigurationen durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Jahresarbeitszahl von Solar/Eisspeicherwärmepumpen etwa in der Mitte zwischen der von Luft- und Erdwärmepumpen liegt. Deshalb wird im Rahmen dieser Arbeit für die Jahresarbeitszahl von Solar/Eisspeicherwärmepumpen der Mittelwert der Wärmequellen Luft und Erde angenommen.

Die theoretisch maximale Leistungszahl  $COP_{max}$  wird anhand des reziproken Carnot-Wirkungsgrads  $\eta_c$  berechnet (vgl. Formel (5-2)):

$$COP_{max} = \frac{1}{\eta_c} = \frac{T_K}{T_K - T_V} \quad (5-2)$$

$COP_{max}$     Theoretisch maximale Leistungszahl

$\eta_c$         Carnot-Wirkungsgrad

$T_K$         Kondensationstemperatur

$T_V$         Verdampfungstemperatur

Für die Kondensationstemperatur wird die modellierte Vorlauftemperatur der Raumwärme- und Trinkwarmwasserbereitstellung verwendet. Als Verdampfungstemperatur wird die Quelltemperatur angesetzt. Temperaturdifferenzen an den Wärmeübertragern werden nicht explizit einbezogen, da diese in der anschließenden Kalibrierung mit Jahresarbeitszahlen aus Feldtests implizit berücksichtigt werden. Dabei wird angenommen, dass diese Temperaturdifferenzen im Vergleich zur

gesamten, durch die Wärmepumpe zu überwindenden Temperaturspreizung keine relevante Variation über das Jahr aufweist. Durch Division des stündlichen Wärmeenergiebedarfs durch die theoretischen Leistungszahlen kann der elektrische Lastgang der Wärmepumpen berechnet werden. Die Jahressumme des Wärmeenergiebedarfs dividiert durch den Jahresstrombedarf ergibt folglich die theoretische Jahresarbeitszahl.

### Kalibrierung

Um die Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen praxisnah abzubilden, werden die theoretischen Leistungszahlen anhand von Daten aus Feldtests [65] kalibriert. Für diesen Zweck wird ein Gütegrad für die Jahresarbeitszahl (siehe Bilanzraum 2 in Abbildung 5-2) bestimmt, welcher für Luftwärmepumpen 0,3788 und für Erdwärmepumpen 0,4506 beträgt (vgl. [100]). Dieser wird auf die theoretischen Leistungszahlen entsprechend Formel (5-2) angewendet.

$$COP = COP_{max} \cdot \text{Gütegrad} \quad (5-3)$$

Durch die so modellierte Leistungszahl und den zeitlich aufgelösten Wärmeenergiebedarf wird der stündliche Stromverbrauch ermittelt. Die Jahressumme des Wärmeenergiebedarfs dividiert durch den Stromverbrauch von Wärmepumpe und Heizstab in diesem Zeitraum (vgl. Bilanzraum 3 in Abbildung 5-2) ergibt die modellierte Jahresarbeitszahl der Anlage (vgl. Formel (5-4)).

$$JAZ_{Anlage} = \frac{Q_{gesamt}}{W_{Wärmepumpe} + W_{Heizstab}} \quad (5-4)$$

JAZ	Jahresarbeitszahl
Q	Wärmeenergie
W	Elektrische Energie

Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.3 dargestellt.

### 5.2.2 Heizlast und Volllaststunden

Je nach Wärmequelle erfolgt die Auslegung der Anlage nach Heizlast oder Wärmeenergiebedarf. Die Ermittlung der Heizlast bzw. der Volllaststunden ist im Folgenden beschrieben.

Die Heizlast eines konkreten Gebäudes kann ausführlich auf Basis der Transmissions- und Lüftungswärmeverluste ermittelt werden (vgl. [106]). Diese Vorgehensweise ist im Rahmen dieser Arbeit nicht zielführend, da Informationen wie die Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauteilflächen für die 17,1 Mio. untersuchten Wohngebäude nicht vorliegen. Deshalb wird eine Methodik gewählt, welche die Ermittlung der Heizlast auf Basis der vorhandenen Daten ermöglicht. In Anlehnung an [107] wird die Heizlast durch Division des Wärmeenergiebedarfs (vgl. Kapitel 4) durch die Volllaststunden berechnet. Auf Basis der stündlichen Lastgänge des Wärmeenergiebedarfs nach [59] wurde mittels Regressionsanalyse der funktionale Zusammenhang von Volllaststunden und spezifischem Wärmeenergiebedarf hergestellt (Formel siehe Abbildung 5-4). Die Volllaststunden beziehen sich dabei auf die Bereitstellung von Raumwärme und Trinkwarmwasser. Werte für höhere spezifische Wärmeenergiebedarfe werden extrapoliert.

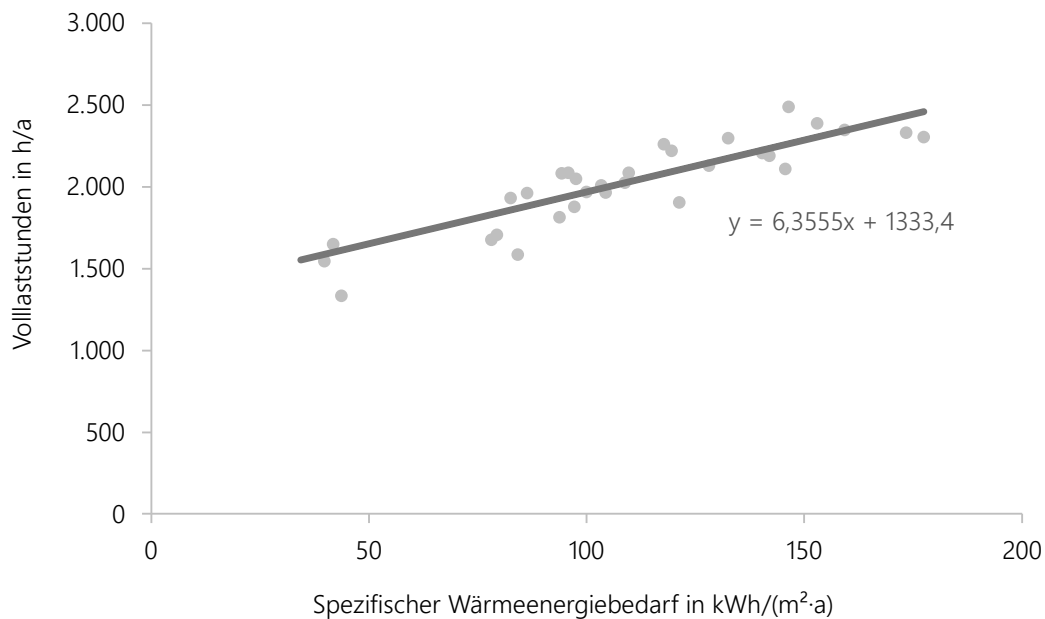


Abbildung 5-4: Volllaststunden in Abhängigkeit des spezifischen Wärmeenergiebedarfs, eigene Darstellung auf Basis von [59]

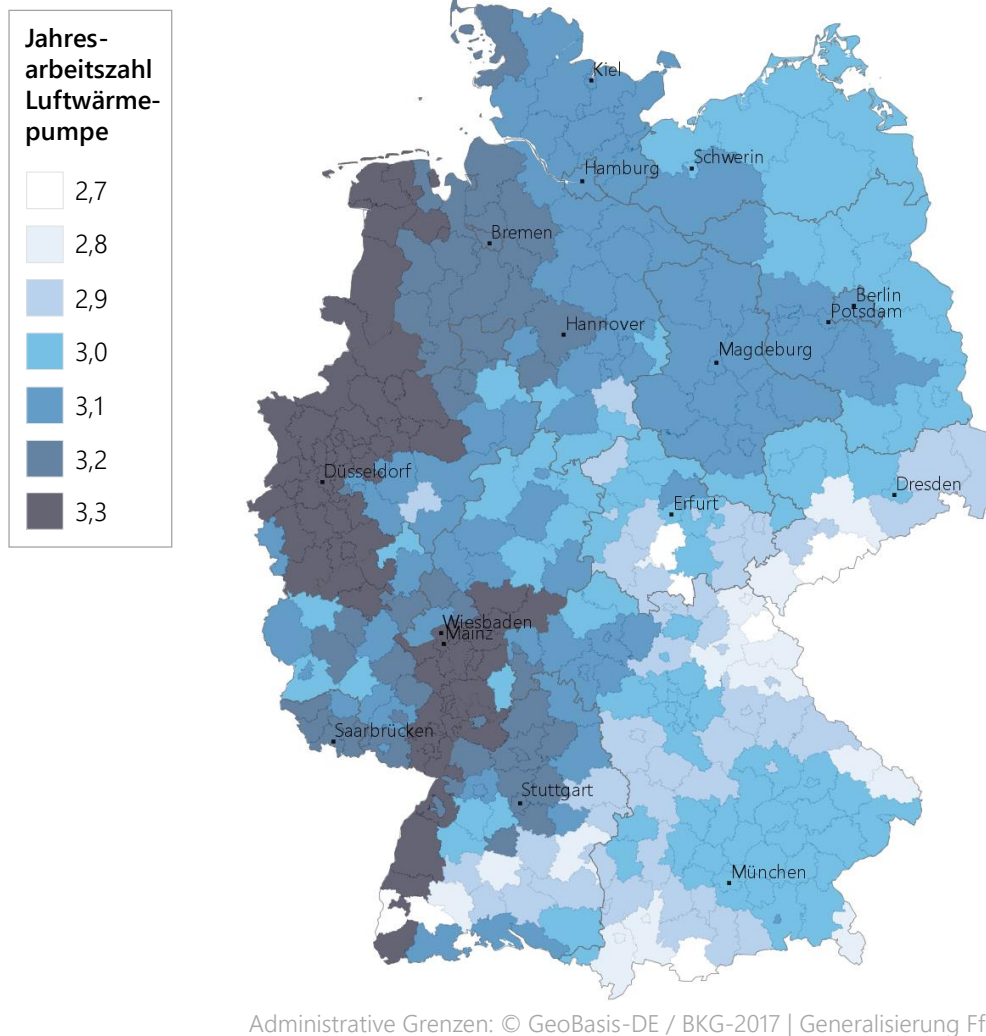
Die beschriebene Dimensionierung auf Basis mittlerer Verbrauchswerte zielt darauf ab, dass die Anlage mit einer hohen Auslastung betrieben wird. Eine Überdimensionierung von Wärmepumpen ist für die Effizienz hingegen nicht förderlich, weshalb im Rahmen dieser Arbeit keine Zuschläge zur Heizlast berücksichtigt werden.

### 5.3 Ergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse zur modellierten Jahresarbeitszahl und Heizlast dargestellt.

#### Jahresarbeitszahl

Abbildung 5-5 zeigt die Jahresarbeitszahl von Luftwärmepumpen je Landkreis am Beispiel der am weitesten verbreiteten Kategorie, der Ein-/Zweifamilienhäuser mit Baujahr vor 1979. In Regionen wie West- und Norddeutschland, die vom maritimen Klima geprägt sind werden höhere Jahresarbeitszahlen von bis zu 3,3 erreicht. Demgegenüber werden in Regionen in denen die Außenlufttemperatur im Winter geringere Werte annimmt, speziell in höher gelegenen Gebieten wie dem Alpenraum, geringere Jahresarbeitszahlen von minimal 2,7 erreicht. Die regionale Verteilung der Jahresarbeitszahl von Luftwärmepumpen zeigt den Zusammenhang zwischen regionalem Klima und der Effizienz dieser Technologie auf. Vereinfacht gilt: Je höher die mittlere Außenlufttemperatur, desto höher ist die Jahresarbeitszahl.



Administrative Grenzen: © GeoBasis-DE / BKG-2017 | Generalisierung FFE

Abbildung 5-5: Jahresarbeitszahl von Luftwärmepumpen in Ein-/ Zweifamilienhäusern mit Baujahr vor 1979

Die Jahresarbeitszahl von Erdwärmepumpen weist aufgrund der identischen Vorlauftemperatur eine ähnliche regionale Aufteilung und entsprechend der im Mittel höheren Quelltemperatur geringere absolute Unterschiede auf (vgl. Abbildung 14-3 im Anhang). Die Ergebnisse der verschiedenen Gebäudetypen bzw. Baualtersklassen unterscheiden sich hinsichtlich der Trinkwarmwasserbereitstellung, wobei mit zunehmender Trinkwarmwassertemperatur und Anteil am Wärmeenergiebedarf die Jahresarbeitszahl abnimmt. Maximal sinkt die Jahresarbeitszahl dadurch je nach Landkreis um 0,2 bis 0,3 (Luftwärmepumpe) bzw. 0,3 bis 0,4 (Erdwärmepumpe) gegenüber den Werten in Abbildung 5-5 bzw. Abbildung 14-3 (im Anhang). Im Mittel weisen Luftwärmepumpen eine Jahresarbeitszahl in Höhe von 3,0 und Erdwärmepumpen von 3,7 auf. Ein Vergleich mit Simulationsstudien (vgl. [105], [108] und [109]), weiteren Feldtests (vgl. [110] und [72]) und Systemstudien (vgl. [17], [111] und [112]) zeigt, dass die modellierten Jahresarbeitszahlen der Wärmequellen plausibel sind.

### Heizlast je Gebäudetyp

Abbildung 5-6 stellt eine statistische Auswertung der Heizlast (Methodik vgl. Kapitel 5.2.2) je Gebäudetyp dar. Nach dem Median beurteilt beträgt die Heizlast von Ein-/ Zweifamilienhäusern 10 kW, Doppelhaushälften 9 kW, Reihenhäusern 8 kW, kleinen Mehrfamilienhäusern 18 kW und großen Mehrfamilienhäusern 31 kW. Die von Mehrfamilienhäusern benötigte thermische Leistung weist nach absoluten Zahlen eine deutlich größere Schwankung als die weiteren Gebäudetypen auf,

was auf die Bandbreite an Mehrfamilienhäusern (von 7 bis über 20 Wohneinheiten) zurückzuführen ist. Die Verteilung der Werte für diesen Gebäudetyp spiegelt wider, dass der Großteil dieser Gebäude der Klasse 7 bis 12 Wohneinheiten (vgl. [47]) zuzuordnen ist.

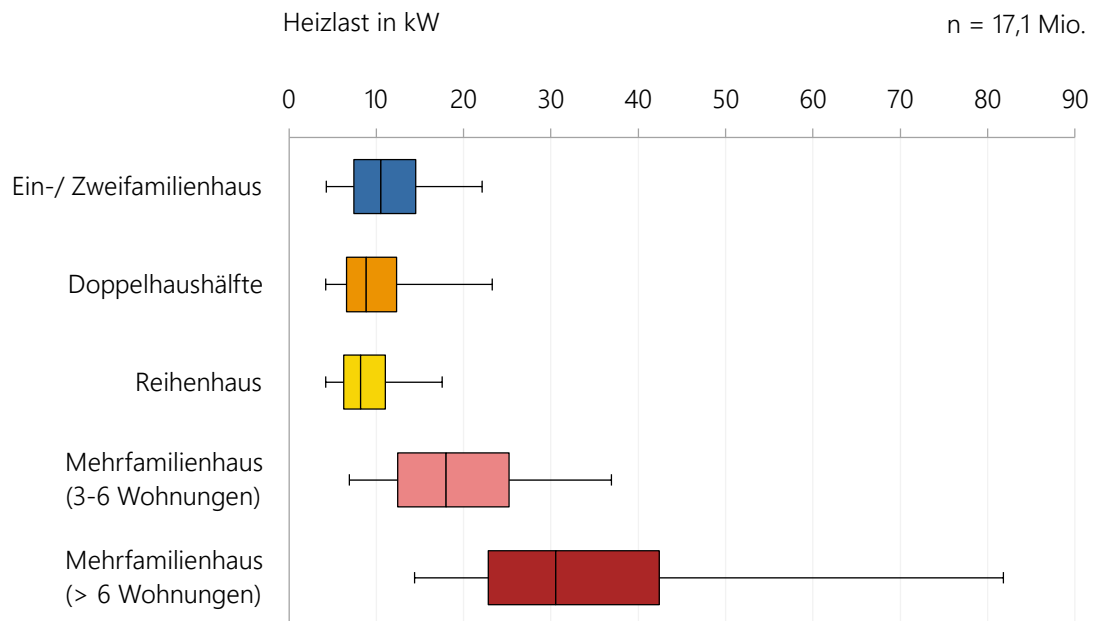


Abbildung 5-6: Heizlast je Gebäudetyp

Ein Vergleich der auf die Wohnfläche bezogenen spezifischen Heizlast mit Literaturwerten (vgl. [67] und [68]) zeigt, dass die Modellergebnisse im unteren bis mittleren Bereich der Literaturwerte liegen. Nach [67] liegen in Bestandsgebäuden theoretische Literaturwerte jedoch meist 10 bis 15 % über der maximalen Heizlast in der Praxis, weshalb diese als zu konservativ eingestuft werden. Ein Vergleich mit der Heizleistung bestehender Heizkessel ist nicht zielführend, da diese 1,3 bis 5-fach überdimensioniert sind (vgl. [67]). Die dargestellte Dimensionierung hingegen führt zu einer hohen Auslastung und damit Effizienz der Wärmepumpe. Vor dem Hintergrund der Klimaerwärmung nimmt der Wärmeenergiebedarf (vgl. [59]) sowie die benötigte Heizlast perspektivisch ab.

## 5.4 Zwischenfazit

Die Effizienz der Wärmepumpen hat Auswirkungen auf den Bedarf an Umweltwärme (siehe Abbildung 5-1) und somit die Potenzialanalyse sowie den Strombedarf (vgl. Kapitel 10). Das Anlagen-Modell bildet die Effizienz von Wärmepumpen zeitlich und räumlich aufgelöst in Abhängigkeit der Temperaturspreizung sowie des Wärmeenergiebedarfs ab. Aus dem Wärmeenergiebedarf sowie der Vorlauf- und der Quelltemperatur werden mit dem reziproken Carnotwirkungsgrad theoretische Leistungszahlen berechnet, welche anschließend mit praxisnahen Werten aus Feldtests kalibriert werden. Das Ergebnis des Modells sind Jahresarbeitszahlen je Gebäudetyp, Baualter, Wärmequelle und Landkreis. Im ungewichteten Mittel über die Landkreise, Gebäudetypen und Baualterklassen erreichen Luftwärmepumpen eine Jahresarbeitszahl von 3,0, Solar/Eisspeicherwärmepumpen 3,3 und Erdwärmepumpen 3,6. Die Modellierung der Leistungszahl könnte wie oben beschrieben weiter detailliert werden, was im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht zielführend ist, da lediglich die Jahresarbeitszahl weiterverwendet wird. Der Einfluss der Jahresarbeitszahl auf das Potenzial von Wärmepumpen ist eher gering (vgl. Kapitel 5.1).

## 6 Luftwärme-Modell

Die Voranalyse (vgl. Kapitel 3) hat gezeigt, dass Außenluft als Wärmequelle für den flächendeckenden Einsatz von Wärmepumpen grundlegend geeignet ist. Dieses Kapitel beschreibt die Quantifikation des Potenzials von Luftwärme als Wärmequelle für Wärmepumpen. Da in Deutschland überwiegend Wasser als Medium zur Wärmeverteilung in Wohngebäuden zum Einsatz kommt, werden ausschließlich Luft-Wasser-Wärmepumpen untersucht und im Rahmen dieser Arbeit als Luftwärmepumpen bezeichnet. Die Bestimmung des Potenzials beruht auf dem Vergleich des Wärmeenergiebedarfs (vgl. Kapitel 4) und des Angebots der Wärmequelle Außenluft je Gebäude. So wird überprüft, ob die Wärmeversorgung mittels Luftwärmepumpe möglich ist. Das maximal verfügbare Angebot an Wärmeenergie der Luftwärmepumpe wird maßgeblich limitiert durch die Anforderungen des Schallschutzes. Damit die Richtwerte für Schallimmissionen in schützenswerten Räumen von benachbarten Wohngebäuden nicht überschritten werden, muss ausreichend Abstand zwischen Anlagenstandort und Nachbarbebauung vorhanden sein.

In den Kapiteln 6.1 bis 6.3 sind die Grundlagen, Methodik und Ergebnisse des Luftwärme-Modells beschrieben. Darauf aufbauend wird in Kapitel 6.4 ein Zwischenfazit gezogen.

### 6.1 Grundlagen

Als Basis für die Beschreibung der Methodik in Kapitel 6.2 sind nachfolgend Grundlagen zur Erschließung der Wärmequelle sowie relevante Begriffe der Schallausbreitung kurz beschrieben.

#### 6.1.1 Erschließung der Wärmequelle

Für die Aufstellung von Luftwärmepumpen existieren verschiedene Möglichkeiten (vgl. Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1: Varianten von Luftwärmepumpen [68]

Variante	Beschreibung
Innen-aufstellung	Die gesamte Wärmepumpenanlage befindet sich im Technikraum des Gebäudes. Die Außenluft wird über Luftkanäle nach innen gefördert. Zu- und Abluftöffnung werden in ausreichendem Abstand voneinander angebracht, sodass ein thermischer Kurzschluss bzw. Effizienzeinbußen vermieden werden.
Außen-aufstellung	Das gesamte Heizsystem befindet sich außerhalb des Gebäudes. Anhand von wärmegeprägten Wasserleitungen wird die Wärme in das Gebäude transportiert und an das Verteilsystem übergeben.
Split-aufstellung	Bei dieser Variante wird der Verdampfer der Wärmepumpe außen und der Verflüssiger innen aufgestellt. Diese Komponenten sind über Kältemittelleitungen verbunden, für die i. d. R. nur geringfügige bauliche Maßnahmen erforderlich sind.

Alle drei Varianten verursachen durch die Bewegung der Luft Schall und können grundsätzlich in Wohngebäuden zum Einsatz kommen, weshalb keine Einschränkung diesbezüglich vorgenommen

wird. Auf die Unterschiede der Höhe der Schallemissionen der drei Anlagenvarianten wird in Kapitel 6.2.2.2 und 6.2.4 eingegangen.

## 6.1.2 Grundlagen Schall

In diesem Kapitel sind die für diese Arbeit relevanten Grundlagen zum Thema Schall aus [50] zusammengefasst.

### Luftschall

Geräuschquellen emittieren Luftschall, indem Sie abwechselnd einen Über- bzw. Unterdruck erzeugen und so die Luft in Schwingung versetzen. Schallwellen breiten sich in der Luft aus, gelangen ans menschliche Ohr und können teilweise wahrgenommen werden.

### Körperschall

Körperschall wird in Festkörpern wie dem Gebäude transportiert. Durch die Bewegung von Körperoberflächen kann wiederum Luftschall emittiert werden.

### Emission

Der von einer Geräuschquelle ausgesandte Schall wird Emission genannt. Diese wird mit der Größe Schallleistungspegel angegeben.

### Immission

Die Einwirkung von Schall auf einen bestimmten Ort bzw. Empfänger wird Immission genannt. Die entsprechende Messgröße heißt Schalldruckpegel.

Abbildung 6-1 visualisiert den Unterschied zwischen Emission und Immission.

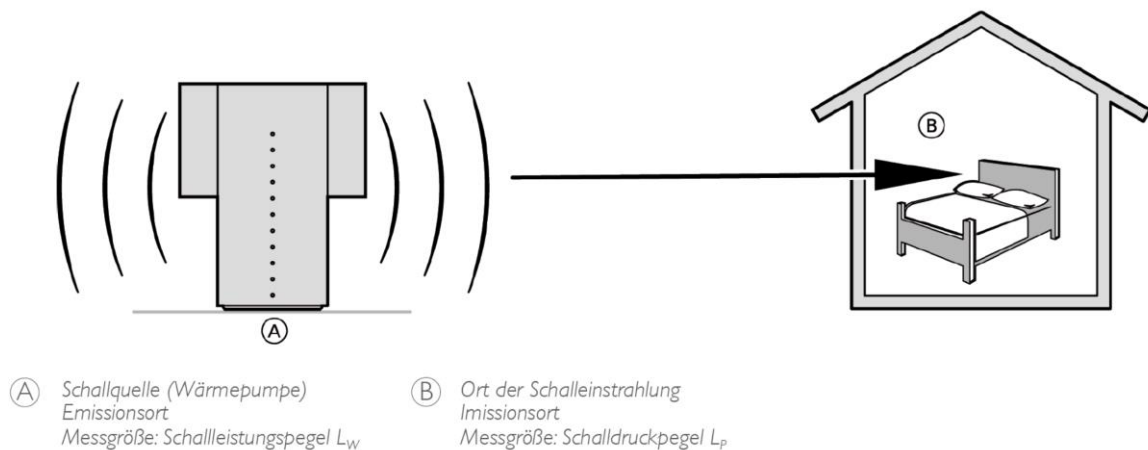


Abbildung 6-1: Unterscheidung von Schallemission und -immission [50]



## Die Einheit Dezibel

Sowohl der Schallleistungspegel als auch der Schalldruckpegel werden in der Einheit Dezibel (dB) angegeben. Formel (6-1) zeigt die Definition des Schalldruckpegels in Dezibel (vgl. [113]).

$$L_p = 20 \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right) \text{ dB} \quad (6-1)$$

$L_p$	Schalldruckpegel in dB
$p$	Gemessener Schalldruck in Pa
$p_0$	Bezugsschalldruck $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (Hörschwelle bei 1.000 Hz)

## Wahrnehmung von Schall

Das menschliche Ohr ist nicht für alle Tonhöhen gleich empfindlich. Der lineare Schallpegel entspricht deshalb nicht der empfundenen Lautstärke eines Geräusches. Eine bessere Vergleichbarkeit wird durch den Einsatz des sogenannten A-Filters gewonnen. Der A-Filter vermindert oder verstärkt das Schallsignal in den verschiedenen Tonhöhenbereichen gemäß der Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs (vgl. Abbildung 6-2). Auf diese Weise gemessene Pegel werden in der Einheit dB(A) angegeben.

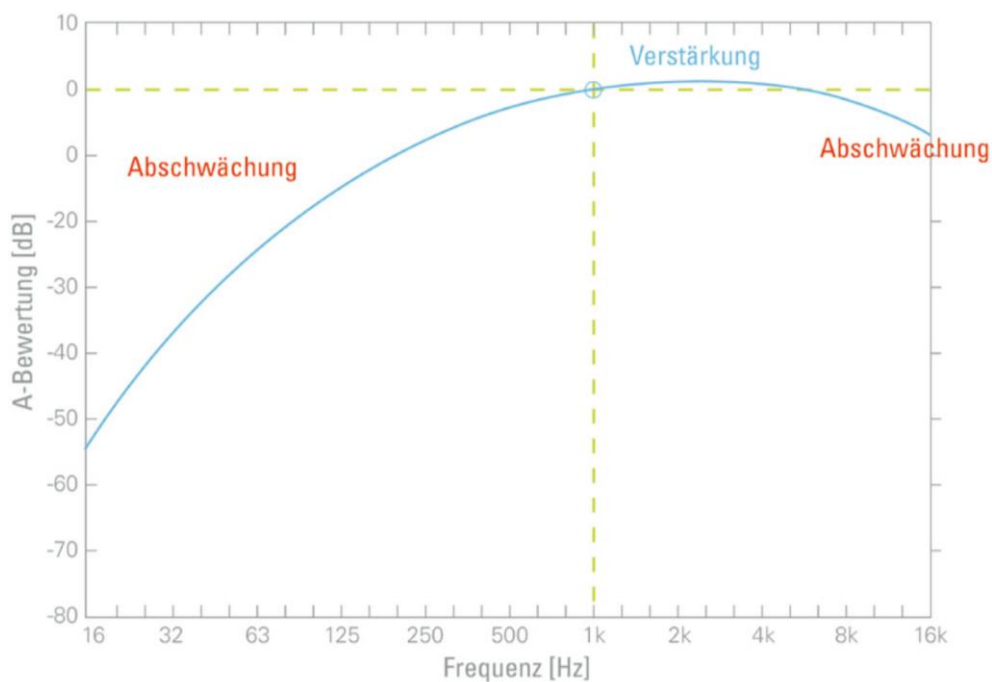


Abbildung 6-2: A-Bewertung von Schallpegeln [50]

## 6.2 Methodik

Dieses Kapitel beschreibt die Methodik zur Quantifizierung des Angebots von Außenluft als Wärmequelle zur Berechnung des Potenzials von Luftwärmepumpen unter Einhaltung des Schallschutzes. Dabei handelt es sich um die Weiterentwicklung der bereits in [114] veröffentlichten Methodik. Die Weiterentwicklung bezieht sich auf:

- das Modell zur Analyse der Aufstellorte (siehe Kapitel 6.2.2.3),
- die Datengrundlage zu den Schallemissionen von Luftwärmepumpen (siehe Kapitel 6.2.4.1),
- die untersuchten Varianten der Schallemissionen (siehe Kapitel 6.2.4.2) und
- die Variante des Aufstellorts direkt am Gebäude (siehe Kapitel 6.2.5).

In Abbildung 6-3 sind die Parameter und deren Zusammenhang visualisiert, um einen Überblick über die Methodik zu geben.

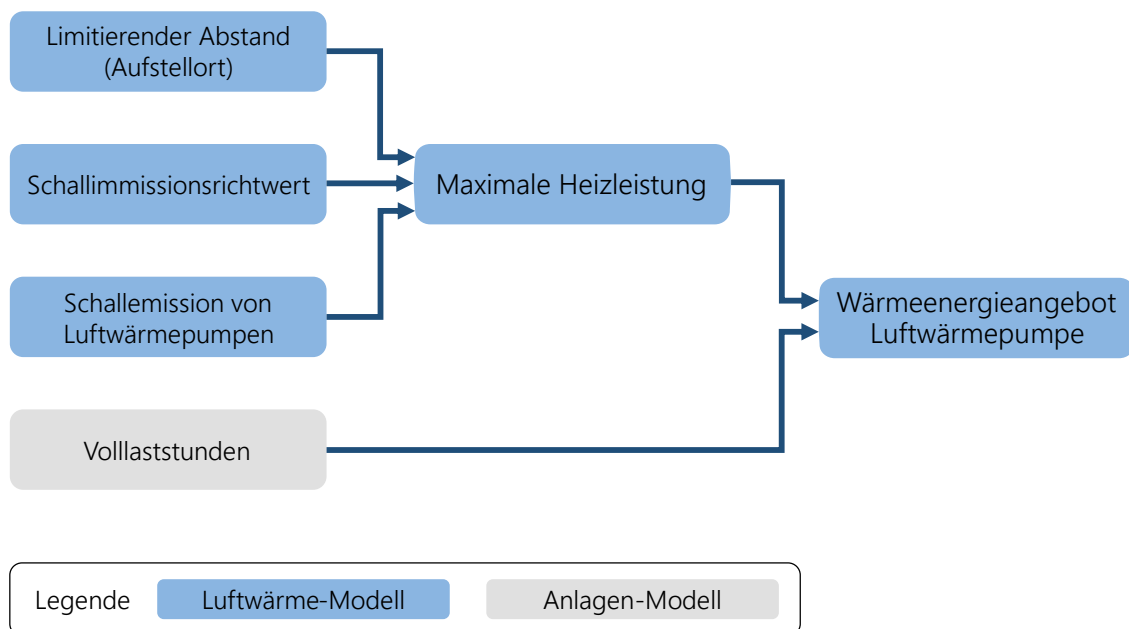


Abbildung 6-3: Überblick Methodik Luftwärme-Modell

Eingangs dient Kapitel 6.2.1 zur Spezifizierung des Untersuchungsrahmens. Im Anschluss werden zur Berechnung des Wärmequellenangebots der limitierende Abstand zu benachbarten Gebäuden untersucht (Kapitel 6.2.2), der anzusetzende Schallimmissionsrichtwert festgelegt (Kapitel 6.2.3) und die Schallemissionen von Luftwärmepumpen analysiert (Kapitel 6.2.4). In Kapitel 6.2.5 erfolgt unter Berücksichtigung der Schallausbreitung die Ermittlung der maximal installierbaren Heizleistung sowie die Berechnung des Wärmeenergieangebots anhand festgelegter Volllaststunden.

### 6.2.1 Untersuchungsrahmen

Im Folgenden ist beschrieben welche Aspekte des Schallschutzes von Luftwärmepumpen das Modell berücksichtigt und welche nicht. Dabei spielt neben der Schallemission von Luftwärmepumpen das Umfeld, in dem diese installiert werden, eine relevante Rolle für die Schallausbreitung bzw. die Höhe der Immission. Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Einflüsse mit der höchsten Relevanz anhand eines Modells abzubilden, um das Potenzial von Luftwärmepumpen praxisnah zu quantifizieren.

### Nachbarbebauung als Immissionsort

Für Immissionen von Schall sind im Bundesimmissionsschutzgesetz Richtwerte festgelegt. Diese gelten für schutzbedürftige Räume wie Wohn- und Schlafräume [115]. [49] definiert sowohl Richtwerte für Immissionsorte innerhalb als auch außerhalb von Gebäuden. Es wird davon ausgegangen, dass die Richtwerte innerhalb von Gebäuden das Potenzial zum Einsatz von Luftwärmepumpen nicht limitieren, da eine Überschreitung i. d. R. durch fachgerechte Planung und Installation vermieden wird. Analysiert wird deshalb ausschließlich die Schallausbreitung außerhalb von Gebäuden. Der Schallschutz zum mit Wärme versorgten Gebäude hin kann i. d. R. durch die Auswahl des Emissionsortes gewahrt werden. Die Höhe des Wärmequellenangebots, die unter Einhaltung der Schallimmissionsrichtwerte genutzt werden kann, hängt somit v. a. von der Einhaltung der Immissionsrichtwerte an benachbarten Wohngebäuden ab.

### Zweidimensionale Nachbarschaftsanalyse

Die Analyse der Nachbarschaft von Wohngebäuden erfolgt anhand der Lage in zwei Dimensionen auf Basis der Gebäudeumrisse aus OpenStreetMap [37]. Konkret wird der Abstand  $a$  zwischen dem Emissionsort **E** und dem Immissionsort **I** untersucht (siehe Abbildung 6-4).

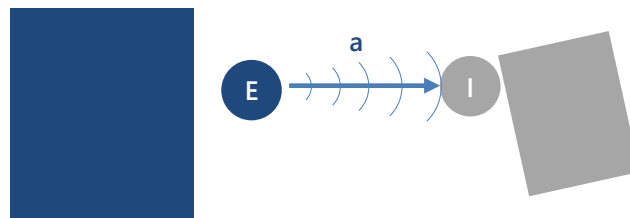


Abbildung 6-4: Zweidimensionale Nachbarschaftsanalyse

Zur Reduktion der Komplexität wird die Höhe der Gebäude nicht berücksichtigt. So sind bestimmte Wege der Schallausbreitung nicht Teil der Bewertung (vgl. Abbildung 6-5).

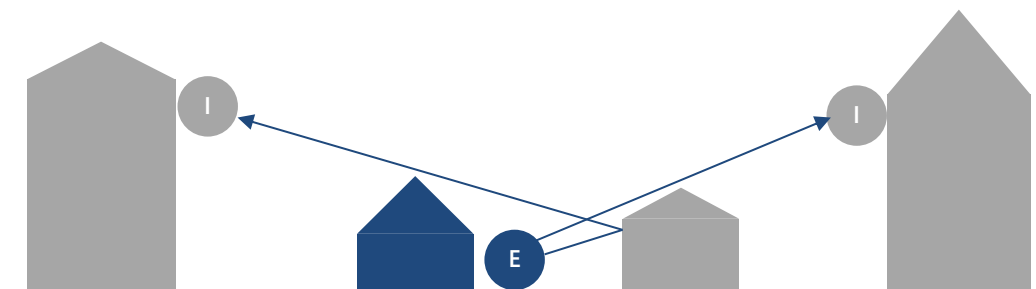


Abbildung 6-5: Nicht berücksichtigte Wege der Schallausbreitung

Die Relevanz dieser vernachlässigten Wege der Schallausbreitung wird als untergeordnet eingestuft, da der Abstand vom Emissionsort zu den in Abbildung 6-5 dargestellten Immissionsorten i. d. R. größer ist als der limitierende Abstand zum nächstgelegenen Wohngebäude bzw. Immissionsort.

### Effekte der Schallausbreitung

Neben der Entfernung zwischen Emissions- und Immissionsort spielen die Effekte der Schallausbreitung eine wichtige Rolle für die Einhaltung der Vorgaben des Schallschutzes. Im Modell sollen die Effekte der Schallausbreitung außerhalb von Gebäuden berücksichtigt werden, welche einen großen Einfluss auf die Höhe des Potenzials aufweisen. Zu diesem Zweck werden die Effekte bezüglich ihrer

Relevanz, Generalisierbarkeit und Datenverfügbarkeit qualitativ bewertet (vgl. Tabelle 6-2). Generalisierbar bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Einfluss des Effekts im Modell einheitlich abgebildet werden kann, sodass er anhand von automatisierten Algorithmen quantifizierbar ist. Die Kategorie Datenverfügbarkeit bezieht sich auf das Vorhandensein frei zugänglicher Informationen je Gebäude für das gesamte Bundesgebiet.

Tabelle 6-2: Untersuchungsrahmen Luftwärme-Modell – Effekte der Schallausbreitung, eigene Auflistung auf Basis von [116], [117] und [50]

Effekt	Relevanz	Generalisierbarkeit	Datenverfügbarkeit	Modelliert mit
Schallausbreitung im freien Feld	✓	✓	✓	Geodaten
Abschirmung durch Gebäude	✓	o	✓	Geodaten
Reflexion am betrachteten Gebäudekomplex	✓	o	✓	Geodaten
Schallbeugung an Rändern	o	✓	✓	Geodaten
Reflexion an anderen Gebäuden	o	o	✓	x
Reflexion durch schallharte Oberflächen	o	x	x	x
Pegelminderung durch schallabsorbierende Oberflächen, Flora oder Einhausung	o	x	x	x
Klimatische Einflüsse wie Windrichtung und Schnee	o	x	x	x
Aufteilung der Schallquellen	x	x	x	x

✓ = zutreffend; o = eingeschränkt zutreffend; x = nicht zutreffend

Die analysierten Effekte der Schallausbreitung sind:

- **Schallausbreitung im freien Feld:** Sie beschreibt die Abnahme des Schalldruckpegels über die Entfernung von Emissions- zu Immissionsort.
- **Abschirmung:** Befindet sich zwischen Emissions- und Immissionsort ein massives Hindernis wie ein Gebäude, dann wird der Schalldruckpegel hierdurch signifikant reduziert.
- **Reflexion am betrachteten Gebäudekomplex:** An ungünstigen Aufstellorten wird durch geometrische Anordnungen – wie Ecken – Schall reflektiert und somit der Schalldruckpegel erhöht.
- **Schallbeugung an Rändern:** An Rändern von Hindernissen kann es zu dem Effekt der Schallbeugung kommen, sodass auch ohne Sichtkontakt zur Schallquelle Geräusche von ihr wahrnehmbar sind. Aufgrund der langen Wellenlänge in der Akustik, tritt dieser Effekt wesentlich stärker als beispielsweise in der Optik auf [116].

Wie diese Effekte im Modell berücksichtigt werden, ist in den Kapiteln 6.2.2 und 6.2.5 beschrieben.

## 6.2.2 Limitierender Abstand zu benachbarten Wohngebäuden

In diesem Kapitel ist die Methodik zur Bestimmung des limitierenden Abstands zu benachbarten Wohngebäuden beschrieben. Dabei werden zwei Parameter unterschieden:

- der **minimale Abstand** eines Emissionsorts zum nächstgelegenen Wohngebäude (Immissionsort) und
- der **limitierende Abstand** als Maximalwert der minimalen Abstände aller untersuchten Emissionsorte eines Gebäudes (Variante: Optimaler Aufstellort vgl. Tabelle 6-3).

Abbildung 6-6 zeigt schematisch die Ermittlung dieser Parameter: Beispielsweise stellt die direkte Verbindung zwischen dem Emissionsort  $E_1$  und dem nächstgelegenen Immissionsort  $I_1$  den minimalen Abstand  $a_{E1, \min}$  dar. Auf diese Weise werden je Gebäude verschiedene Emissionsorte wie  $E_1$ ,  $E_2$  usw. und die zugehörigen minimalen Abstände analysiert. Verbindungen, die durch ein Gebäude verlaufen, werden hierbei nicht berücksichtigt, da diese durch Abschirmung deutlich reduziert werden (z. B. von  $E_3$  zu  $I_1$ ). Die anschließende Auswertung des limitierenden Abstands erfolgt differenziert für Emissionsorte, die frei stehen (wie  $E_1$ ) und Emissionsorte, die an geometrischen Anordnungen wie Ecken liegen und durch vermehrte Reflexion zu einer Erhöhung des Schalldruckpegels führen (wie  $E_2$ ). So kann zur Berechnung des Wärmequellenangebots von Luftwärmepumpen (vgl. Kapitel 6.2.5) ein Malus für reflexionsanfällige Standorte (vgl. Kapitel 6.2.2.2) berücksichtigt werden.

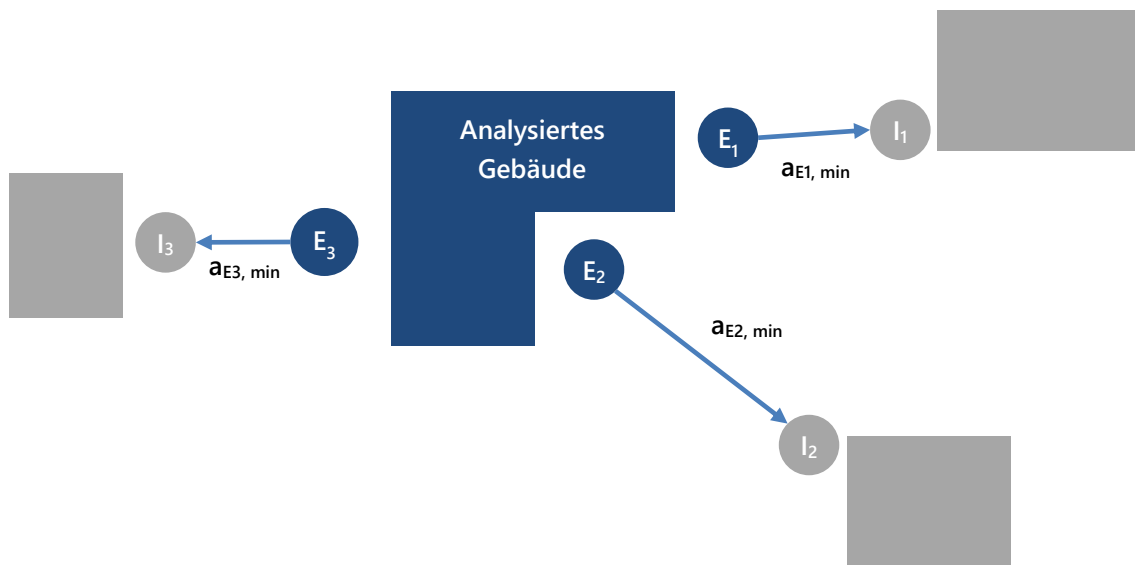


Abbildung 6-6: Schema zur Ermittlung des minimalen Abstands je Emissionsort

### 6.2.2.1 Immissionsort

Wie in Kapitel 6.2.1 erläutert steht die Einhaltung der Schallschutz-Anforderungen an benachbarten Wohngebäuden im Fokus dieser Arbeit. Nach [115] sind u. a. Wohn- und Schlafräume schutzbedürftig. Bei einer Messung wird die Einhaltung der Richtwerte 0,5 m vor der Mitte des geöffneten Fensters des nächstgelegenen schutzbedürftigen Raums überprüft [50]. Da die Nutzung der Räume nicht bekannt ist, wird als Immissionsort der nächstgelegene Punkt des Nachbargebäudes abzüglich 0,5 m angenommen. In Industrie- und Gewerbegebieten gelten deutlich höhere Immissionsrichtwerte für Schall (vgl. Abbildung 6-9), weshalb Nichtwohngebäude nicht als Immissionsort eingeordnet werden.

## 6.2.2.2 Einfluss des Aufstellorts

Schallemissionen werden von Bauteilen der Luftwärmepumpe und durch die Bewegung der Luft verursacht. Je nach Bauart befindet sich im Außenbereich des Gebäudes (Aufstellort) entweder die gesamte Wärmepumpe (Außenaufstellung), die Außeneinheit des Geräts (Splitaufstellung) oder nur der Lufteintritt bzw. -austritt (Innenaufstellung). In jedem Fall entstehen an dem Aufstellort durch die Luftbewegung Schallemissionen, da aufgrund der geringen Wärmekapazität von Luft ein hoher Volumenstrom von 300 bis 500 m<sup>3</sup>/(h\*kW) nötig ist [68]. Der Aufstellort entspricht im Rahmen dieser Arbeit dem Emissionsort. Abbildung 6-7 zeigt welchen Einfluss der Aufstellort auf den Schalldruckpegel hat. Dieser wird mit dem sogenannten Raumwinkelmaß  $K_0$  angegeben.

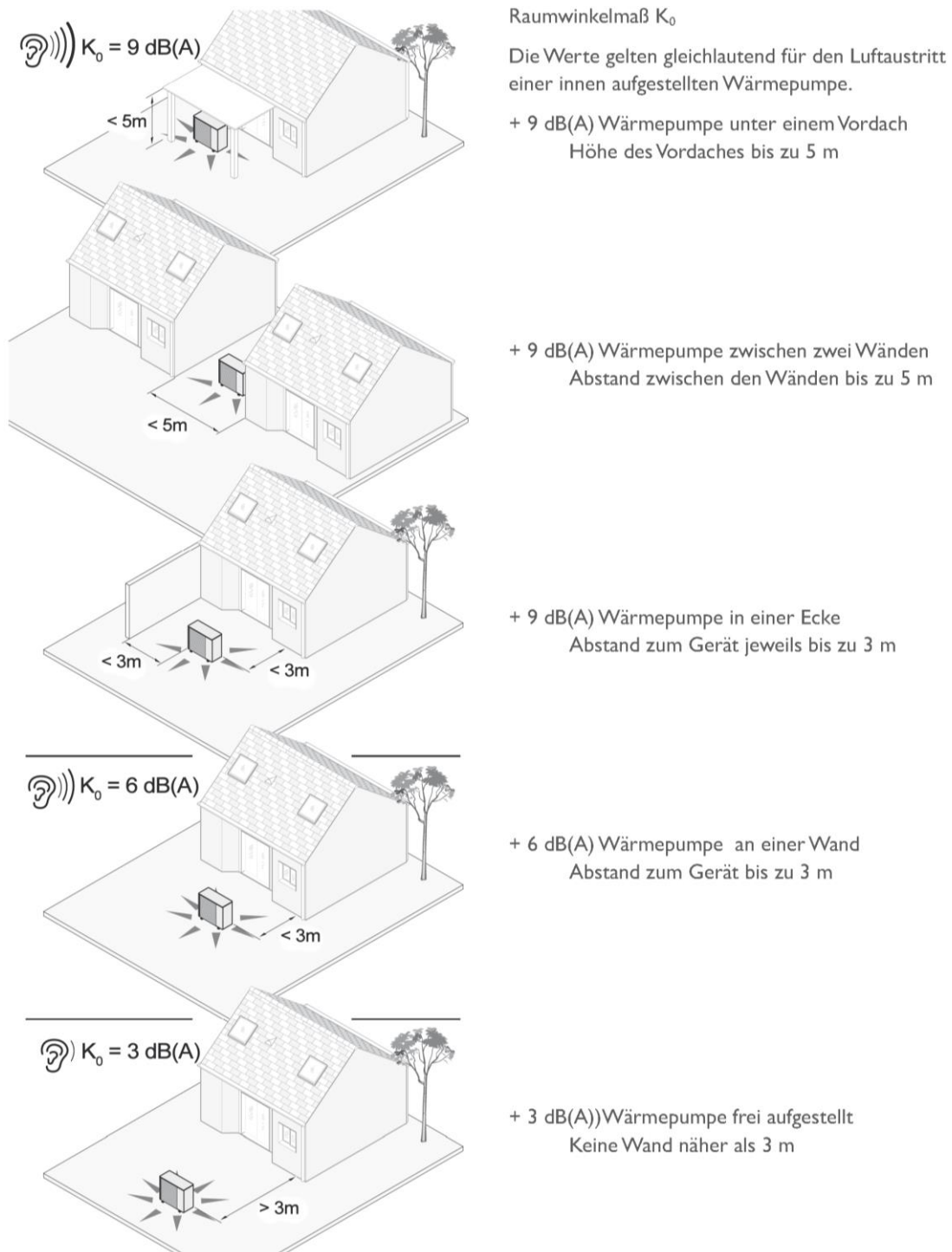


Abbildung 6-7: Raumwinkelmaß in Abhängigkeit des Aufstellorts [50]

Im Idealfall befindet sich keine Wand näher als 3 m zum Aufstellort, sodass ein Raumwinkelmaß von 3 dB(A) angesetzt werden kann. Ist der Aufstellort näher als 3 m am Gebäude beträgt es 6 dB(A). Ein Aufstellort in einer Ecke, eng zwischen Gebäuden oder unter einem Vordach entspricht einem Raumwinkelmaß von 9 dB(A). [50]

Im Modell wird der Aufstellort der Luftwärmepumpe in 3 m Entfernung von dem zu betrachtenden Haus angenommen. Dies stellt einen Kompromiss aus Leitungslänge und geringer Anfälligkeit für Reflexion dar. In Ecken wird ein Raumwinkelmaß von 9 dB(A) angesetzt. In der Sensitivitätsanalyse (siehe Kapitel 6.3.3) wird zudem die Aufstellung in 0,5 m Abstand zum Gebäude analysiert, was einem Raumwinkelmaß von 6 dB(A) entspricht.

### 6.2.2.3 Modell zur Analyse von Aufstellorten

Um die Einsatzmöglichkeiten von Luftwärmepumpen beurteilen zu können, sollen verschiedene Aufstellorte rund um das Gebäude analysiert werden. Die Anzahl der untersuchten Standorte orientiert sich an der Gebäudegröße und beträgt mindestens acht. Die ermittelten Abstände werden statistisch ausgewertet, um die in Tabelle 6-3 aufgeführten Varianten des Aufstellorts ausweisen zu können. Um ein praxisnahes Potenzial zu erhalten, wird wie für die weiteren Wärmequellen (vgl. Kapitel 7.2.5 und 8.2.2) ein Abschlag für die Nutzbarkeit der Grundstücksfläche berücksichtigt. Die Nutzungskonkurrenz kann im Fall der Luftwärmepumpe durch eine Terrasse, einen Weg, einen Hauseingang o. ä. bestehen und die Wahl des Aufstellorts maßgeblich beeinflussen. Eine Quantifikation dieser Nutzungskonkurrenz wird durch die zum Teil subjektiven Kriterien hierfür erschwert. Deshalb wird der Median der minimalen Abstände als Referenzfall angenommen. Die zwei weiteren Varianten optimaler und ungünstiger Aufstellort werden in der Sensitivitätsanalyse (vgl. Kapitel 6.3.3) untersucht.

Tabelle 6-3: Untersuchte Varianten des Aufstellorts von Luftwärmepumpen

Variante	Limitierender Abstand zu Nachbargebäude	Beschreibung
Optimaler Aufstellort	Maximalwert der minimalen Abstände	Theoretisches Optimum
Mittlerer Aufstellort (Referenz)	Median der minimalen Abstände	Annahme: optimaler Aufstellort aufgrund von Nutzungskonkurrenz o. ä. nicht realisierbar
Ungünstigster Aufstellort	Minimalwert der minimalen Abstände	Unteres Limit

Der limitierende Abstand wird mittels zweidimensionaler Gebäudeumrisse aus [37] und geografischen Funktionen bestimmt. Hierfür wird auf Basis einer Geodatenbank (PostgreSQL mit PostGIS-Erweiterung) ein Algorithmus entwickelt. Dieser wird separat für jedes der 17,1 Mio. untersuchten Wohngebäude ausgeführt. Dabei werden jeweils folgende Prozessschritte durchlaufen:

#### 1. Identifikation von Nachbargebäuden

Zur Reduktion der Rechenzeit werden ausschließlich Nachbargebäude analysiert, die in einem Umkreis von 50 m zur Geometrie des analysierten Gebäudes liegen. Ein Einfluss auf weiter entfernte Wohngebäude wird ausgeschlossen. Gebäude, die in dieser Entfernung keine benachbarten Wohngebäude aufweisen, werden direkt als geeignet für Luftwärmepumpen eingestuft.

## 2. Definition potenzieller Aufstellorte

- Der Aufstellort der Luftwärmepumpe soll in 3 m Entfernung zu dem betrachteten Gebäude liegen (vgl. Kapitel 6.2.2.2). Um die Gebäudegeometrie wird hierfür ein Puffer mit 3 m Abstand erstellt. Als Puffer wird in diesem Kontext ein Polygon bezeichnet, das mit einem einheitlichen Abstand um eine Geometrie erstellt wird.
- Der Außenring des Puffers wird als Linie potenzieller Aufstellungsorte extrahiert.
- Auf der Außenlinie werden in regelmäßigem Abstand Punkte als potenzielle Aufstellungsorte interpoliert. Die Anzahl der Punkte variiert je nach Länge der Außenlinie und beträgt minimal acht. Dies stellt für die 17,1 Mio. separat untersuchten Wohngebäude einen Kompromiss aus Detailgrad und Rechenzeit dar.

## 3. Abstände zwischen Aufstellorten und Immissionsorten

Von jedem Aufstellort wird der kürzeste Abstand zu jedem umliegenden Wohngebäude bestimmt. Der nächstgelegene Punkt des Nachbargebäudes wird demnach als schützenswerter Raum betrachtet. Da der maßgebliche Immissionsort 0,5 m vor dem Gebäude liegt [49], wird dieser Wert von allen Abständen abgezogen.

## 4. Abschirmung

Nach [118] ist auf der schallabgewandten Gebäudeseite eine Reduktion des Schalldruckpegels von 15 dB(A) anzusetzen. Dies reduziert die i. d. R. abzubauenen Pegeldifferenz (vgl. Kapitel 6.2.4.1) so weit, dass in Anbetracht der zusätzlich zu überwindenden Entfernung immer von einer Einhaltung der Anforderungen ausgegangen werden kann. Deshalb wird jede Abstandslinie, welche durch Gebäude führt, von dieser Analyse ausgeschlossen.

## 5. Beugung

Um den Effekt der Abschirmung an Aufstellorten wie Gebäudeecken nicht zu überschätzen, wird zusätzlich die Beugung berücksichtigt werden. Diese wird über einen negativen Puffer von 0,5 m, also einer Verkleinerung der Geometrie des Gebäudekomplexes, abgeschätzt. Besteht nach diesem Abzug Sichtkontakt zwischen Emissions- und Immissionsort, wird die entsprechende Verbindungslinie nicht von der Analyse ausgeschlossen.

## 6. Reflexion

- Die Reflexion von Schall an den Wänden des betrachteten Gebäudekomplexes wirkt sich negativ auf die Höhe der Schallimmission an den Nachbargebäuden aus.
- Um die Gebäudekomplexe wird eine sogenannte konvexe Hülle berechnet. Die Außenlinie der konvexen Hülle entspricht der Linie, welche sich ergeben würde, wenn eine Schnur um das gesamte Gebäude gespannt werden würde.
- Für Punkte, die in der konvexen Hülle liegen, wird das Raumwinkelmaß erhöht auf 6 dB(A).

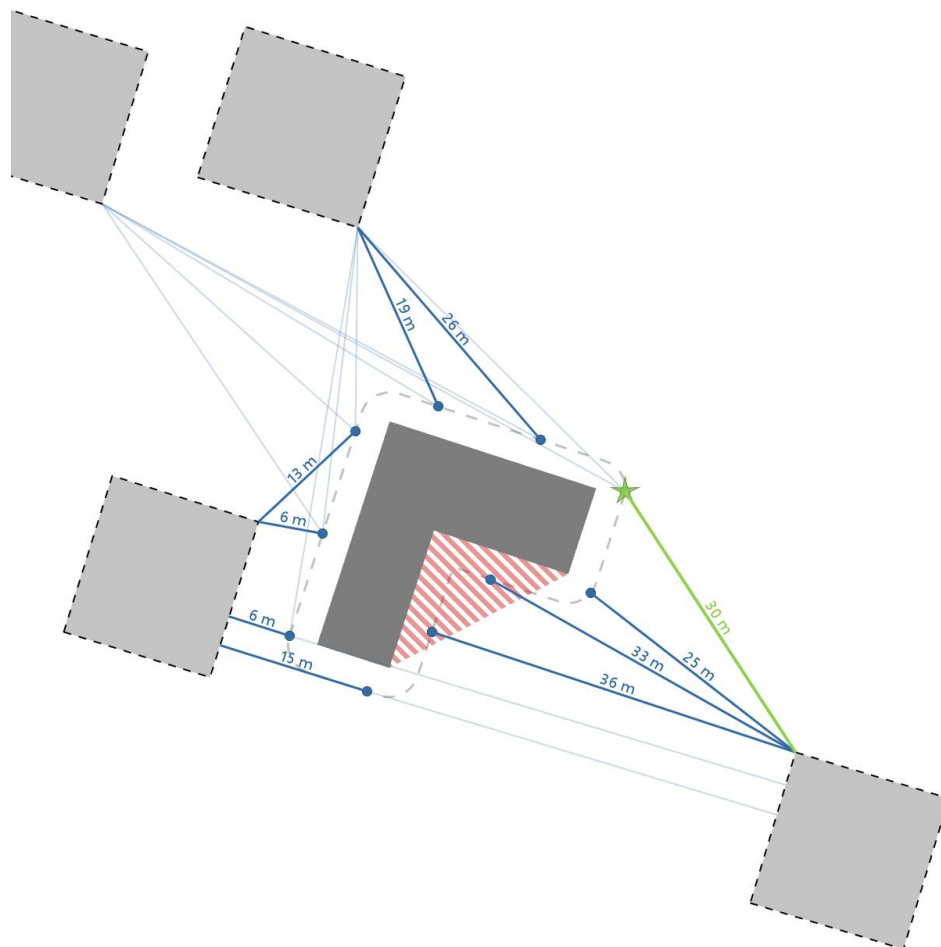


## 7. Aufstellung in Straßennähe

- Aufgrund bereits vorhandener Schallemissionen des Straßenverkehrs und i. d. R. geringerer Nutzungskonkurrenz (z. B. von Terrassen) werden in der Praxis oftmals Aufstellorte auf derjenigen Gebäudeseite gewählt, die der Straße zugewandt ist (vgl. [117]).
- Um dies im Modell abzubilden, werden diejenigen Punkte als Aufstellorte präferiert, welche der Straße zugewandt sind. Dies erfolgt durch Verschneidung der Punkte mit einem Puffer um die Straße von 15 m. Wenn dies auf keinen der Punkte eines Gebäudes zutrifft, werden die weiteren Aufstellorte herangezogen.

Im Resultat werden die minimalen Abstände statistisch ausgewertet, um den optimalen, den mittleren und den ungünstigsten Aufstellort auszuweisen. Der limitierende Abstand entspricht jeweils dem minimalen Abstand des ausgewählten Aufstellorts.

Anhand eines beispielhaften Gebäudes zeigt Abbildung 6-8 den minimalen Abstand zum nächstgelegenen Nachbargebäude je Aufstellort in blau sowie den optimalen Aufstellort und den entsprechenden limitierenden Abstand in grün.



Gebäude: © OpenStreetMap Mitwirkende

Abbildung 6-8: Minimaler Abstand je Aufstellort (blau), optimaler Aufstellort (Stern) sowie limitierender Abstand (grün), Darstellung auf Basis von [37]

### 6.2.3 Immissionsrichtwerte für Schall

Für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden sind in [49] für den Schalldruckpegel am Tag (6:00 bis 22:00 Uhr) und in der Nacht (22:00 bis 6:00 Uhr) Richtwerte definiert, welche nicht dauerhaft überschritten werden dürfen (vgl. Abbildung 6-9). Tagsüber muss der Richtwert in Zeiten erhöhter Empfindlichkeit um 6 dB(A) unterschritten werden [49].

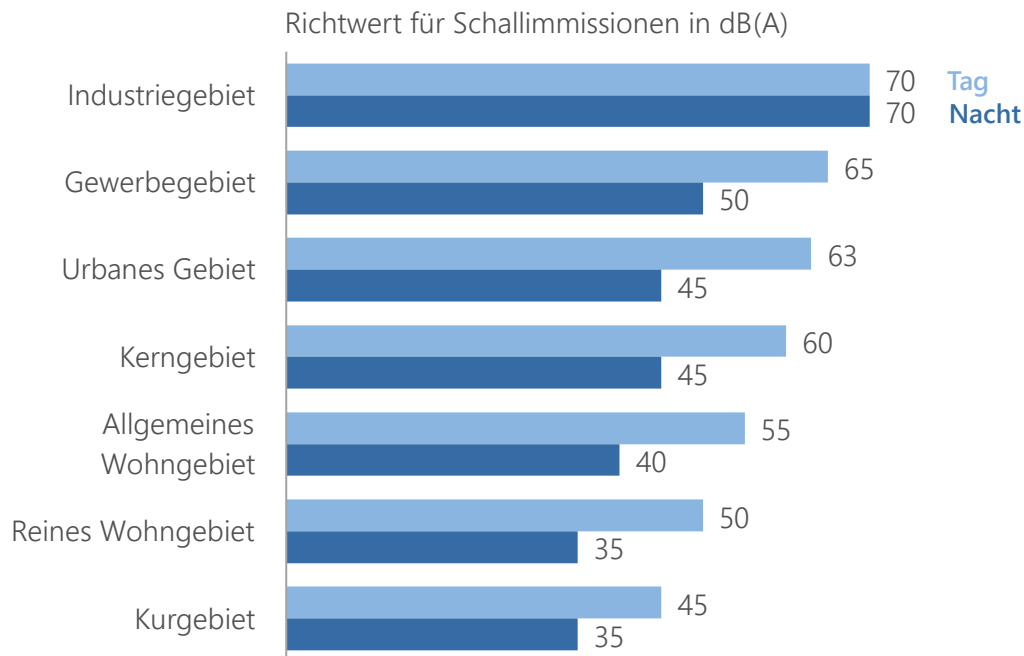


Abbildung 6-9: Richtwerte Schall für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden; eigene Darstellung aus Daten von [49]

Für Gebiete mit überwiegender Wohnnutzung sind die Richtwerte am Tag auch in Zeiten erhöhter Empfindlichkeit deutlich höher als in der Nacht. Auch wenn Luftwärmepumpen vermehrt mit einem schallreduzierten Betrieb für die Nacht ausgestattet sind, limitiert der Richtwert in der Nacht i. d. R. die Leistung bzw. den Einsatz von Luftwärmepumpen (vgl. Kapitel 6.2.4.1).

Die Richtwerte für die Nacht reichen von 45 dB(A) im urbanen Gebiet bis hin zu 35 dB(A) im reinen Wohngebiet bzw. Kurgebiet. Daten zum Gebietstyp sind weder flächendeckend noch frei zugänglich verfügbar. Somit muss im Rahmen dieser Arbeit eine Annahme hinsichtlich des Immissionsrichtwerts getroffen werden. Hier wurde das reine Wohngebiet bzw. der Richtwert in der Nacht von 35 dB(A) ausgewählt. Auch wenn dies den Einsatz von Luftwärmepumpen einschränkt, soll durch diese konservative Annahme die Lebensqualität der Menschen (vgl. [119]) und damit die Akzeptanz der Technologie – auch bei flächendeckendem Einsatz – in allen Gebietstypen gewahrt bleiben.

## 6.2.4 Schallemissionen von Luftwärmepumpen

Für die Einhaltung der Schallschutzanforderungen ist neben dem limitierenden Abstand und dem Immissionsrichtwert die Höhe der Emissionen relevant. Dieses Kapitel erläutert die Datengrundlage und die darauf aufbauende Regressionsanalyse zur Beschreibung der Schallemissionen von am Markt befindlichen Luftwärmepumpen.

### 6.2.4.1 Datengrundlage

Die Daten zur Höhe der Schallemissionen von Luftwärmepumpen sind Herstellerangaben und wurden dem Schallrechner – einem frei und online verfügbaren Planungstool – des Bundesverband Wärmepumpe e. V. [118] am 22. Juni 2022 entnommen. Um die Heterogenität der am Markt befindlichen Luftwärmepumpen in dem für Wohngebäude relevanten Leistungsbereich abzubilden, wurde eine Stichprobe von 102 Anlagen erhoben. Dabei wurden Anlagen verschiedener Bauarten, Hersteller und Leistungsklassen erfasst. Bezüglich der Bauart sind 25 der Innen-, 43 der Split- und 34 der Außenaufstellung zuzuordnen. Insgesamt umfasst die Stichprobe Anlagen von 17 Herstellern, wobei bekannte Marken im Segment Wohngebäude vertreten sind. Die Schallemissionen werden in Relation zur Heizleistung der Anlagen ausgewertet, um die Korrelation der beiden Größen zu analysieren. Deshalb wird im Folgenden zuerst die Heizleistung beschrieben und anschließend die Schalleistungspegel im Tag- und Nachtbetrieb gegenübergestellt.

### Heizleistung

Die heute übliche Betriebsart von Luftwärmepumpen ist der bivalente Parallelbetrieb, wobei die Wärmepumpe bis  $-5\text{ °C}$  monovalent ausgelegt wird und somit 95 % der Jahresheizarbeit verrichtet [67]. Die Vorlauftemperatur, die in Bestandsgebäuden auch mit minimalinvestiven Maßnahmen, wie der gezielten Vergrößerung von Heizkörperflächen, erreicht werden kann, wird mit  $50\text{ °C}$  angenommen (vgl. Kapitel 5.2.1). Dementsprechend soll im Modell für die Anlagenauslegung der Betriebspunkt von A-5/W50 ( $-5\text{ °C}$  Außentemperatur,  $50\text{ °C}$  Wasser- bzw. Vorlauftemperatur) verwendet werden. Die Datenerhebung erfolgt anhand von Recherche der Produktdatenblätter (vgl. [120], [121], [122], [123], [124], [125], [126], [127], [128], [129], [130], [131], [132], [133], [134], [135] und [136]). Für 14 Anlagen konnte die Leistung in diesem Betriebspunkt dem Produktdatenblatt entnommen werden. Für die restlichen 88 Anlagen wurde die Heizleistung für ähnliche Betriebspunkte (A-7/W35, A-5/W55 und A-7/W55) recherchiert. Tabelle 6-4 zeigt anhand des Mittelwerts aller untersuchten Anlagen, wie die Heizleistung von Luftwärmepumpen im Vergleich zum stets angegebenen Betriebspunkt A2/W35 abnimmt.

Tabelle 6-4: Heizleistung von Luftwärmepumpen in Relation zu dem Betriebspunkt A2/W35

Betriebspunkt	Heizleistung (Betriebspunkt) / Heizleistung (A2/W35)
A2/W35	100,0%
A-7/W35	86,6%
A-5/W50	85,9%
A-5/W55	85,4%
A-7/W55	76,6%

Im Weiteren soll die Heizleistung aller betrachteten Anlagen für einen einheitlichen Betriebspunkt (A-5/W50) ausgewiesen werden. Hierzu wird für die 88 Anlagen für die die Heizleistung nicht im Betriebspunkt A-5/W50 vorliegt ein Korrekturfaktor ermittelt. Für diesen Zweck werden die Werte

aus Tabelle 6-4 anhand des Wertes für A5/W50 renormiert. Das Ergebnis ist in Tabelle 6-5 dargestellt und zeigt, dass die recherchierte Heizleistung der einzelnen Anlagen nur geringfügig skaliert wird, sodass die individuelle Anlagencharakteristik bestmöglich erhalten bleibt. Für 78 Anlagen mit Werten für die Betriebspunkte A-7/W35 oder A-5/W55 bedeutet dies eine Erhöhung bzw. Reduktion um lediglich 1 Prozentpunkt. Für 10 Anlagen, die Werte mit dem Betriebspunkt A-7/W55 aufweisen, stellt dies eine Erhöhung der Leistung um 11 Prozentpunkte dar.

Tabelle 6-5: Korrekturfaktor der Heizleistung zu dem Betriebspunkt A-5/W50

Betriebspunkt	Korrekturfaktor zu A-5/W50
A-7/W35	101%
A-5/W50	100%
A-5/W55	99%
A-7/W55	89%

Nach Formel (6-2) lässt sich der Korrekturfaktor aus Tabelle 6-5 auf den Wert je Anlage anwenden:

$$\dot{Q}_{LWP,i}(A-5/W50) = \frac{\dot{Q}_{LWP,i}(BP)}{KF(BP)} \quad (6-2)$$

$\dot{Q}_{LWP}$	Heizleistung der Luftwärmepumpe
KF	Korrekturfaktor
BP	Betriebspunkt
$i$	Laufindex der untersuchten Anlagen von 1 bis 102

Die berechneten Heizleistungen der Anlagen im Betriebspunkt A-5/W50 sind Eingangsdaten für die Gegenüberstellung von Tag- und Nachtbetrieb sowie die darauf aufbauende Regressionsanalyse (vgl. Kapitel 6.2.4.2). Verfügt die Luftwärmepumpe über einen Modus für den Nachtbetrieb, dann wird die Reduktion der Schallemissionen durch die Begrenzung der Lüfterdrehzahl erreicht, was nach [118] zu einer Abnahme der Heizleistung in der Nacht führen kann. Die Höhe der Reduktion kann je nach Hersteller variieren. Für die Dimensionierung der Anlage (vgl. Kapitel 6.2.5) wird diese partielle Leistungsreduktion vernachlässigt, da mögliche Komforteinbußen in der Nacht in Zeiten sehr geringer Außentemperaturen als wenig relevant eingestuft werden.

### Tagbetrieb vs. Nachtbetrieb

Neben der oben beschriebenen Heizleistung der 102 untersuchten Luftwärmepumpen werden die maximalen Schalleistungspegel im Tagbetrieb sowie im schallreduzierten Nachtbetrieb analysiert. Für 9 der 102 untersuchten Anlagen wird nach [118] ein Zuschlag für die Tonhaltigkeit in Höhe von 3 dB(A) einbezogen, welcher die erhöhte Störwirkung hörbarer Einzeltöne abbildet.

Abbildung 6-10 zeigt den maximalen Schalleistungspegel im Tagbetrieb in Abhängigkeit der Heizleistung (A-5/W50). Unter Annahme einer identischen Leistungszahl benötigt eine Anlage mit einer höheren Heizleistung einen höheren Volumenstrom an Luft als eine Anlage mit geringerer Heizleistung. Ein höherer Volumenstrom bedeutet unter ansonsten gleichen Voraussetzungen höhere Schallemissionen. Die Untersuchung von Abbildung 6-10 auf diesen Zusammenhang zeigt bis zu einer Heizleistung von etwa 20 kW eine erkennbare Steigung. Für Heizleistungen über 20 kW ist lediglich eine marginale Steigung sichtbar und zudem die Anzahl der Werte aufgrund der Verfügbarkeit entsprechender Produkte deutlich geringer. In beiden Bereichen tritt zudem eine deutliche Streuung der Werte auf, die auf konstruktive Unterschiede wie den Durchmesser des Lüfters oder

die Entkopplung von Bauteilen hindeuten. Die nachfolgend erläuterte Vorgehensweise hat zum Ziel, die beschriebene Heterogenität anhand eines funktionalen Zusammenhangs abzubilden.

Im Mittel liegen die Emissionen im Tagbetrieb rund 11,5 dB(A) höher als der Immissionsrichtwert im reinen Wohngebiet in Höhe von 50 dB(A). Unter Berücksichtigung des Zuschlags für Tageszeiten erhöhter Empfindlichkeit entspricht die Pegeldifferenz 17,5 dB(A). Die Entfernung zwischen Emissions- zu Immissionsort muss so groß sein, dass die Abnahme des Pegels mindestens dieser Differenz entspricht.

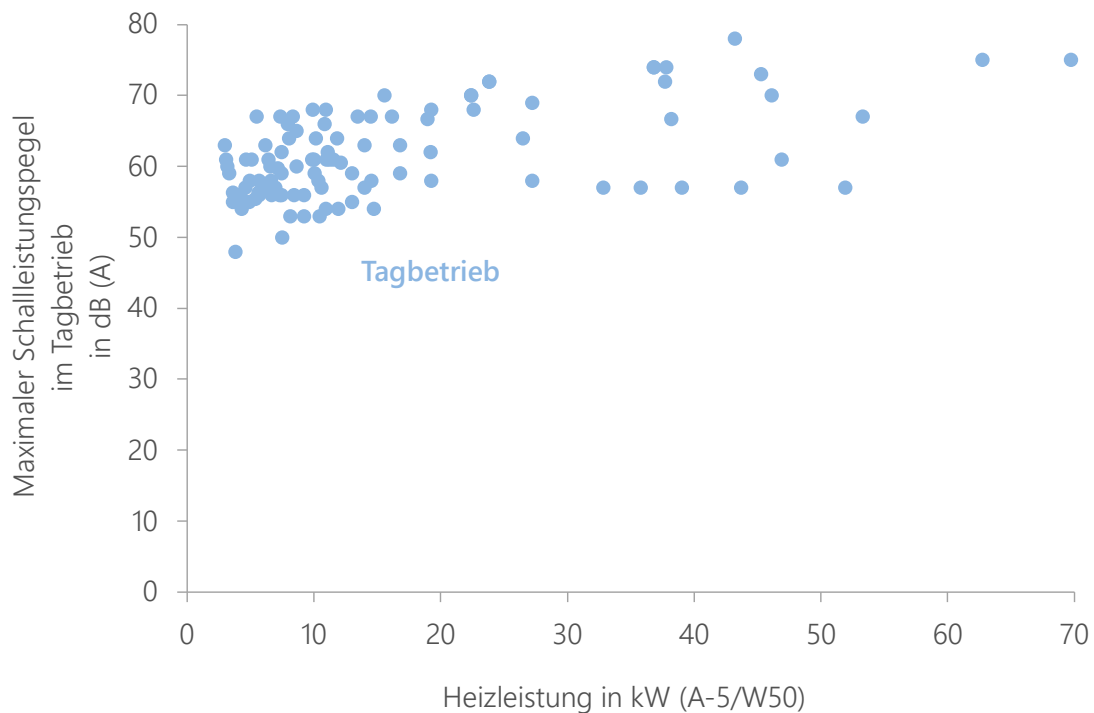


Abbildung 6-10: Tagbetrieb: Schallleistungspegel zu Heizleistung (A-5/W50), eigene Berechnungen und Daten aus [118]

Abbildung 6-11 stellt den Schallleistungspegel im Nachtbetrieb der Heizleistung gegenüber. Die Emissionen im Nachtbetrieb liegen im Mittel rund 22,2 dB(A) über dem Immissionsrichtwert im reinen Wohngebiet in Höhe von 35 dB(A). Zum Abbau dieser Differenz muss im Vergleich zum Tagbetrieb eine weitere Distanz zwischen Emissions- zu Immissionsort vorhanden sein. Die Einhaltung des Immissionsrichtwerts in der Nacht stellt somit i. d. R. eine höhere Anforderung als die Einhaltung der Richtwerte am Tag dar. Dies trifft auch in Zeiten erhöhter Empfindlichkeit zu. Aus diesem Grund beziehen sich alle weiteren Analysen auf den Nachtbetrieb.

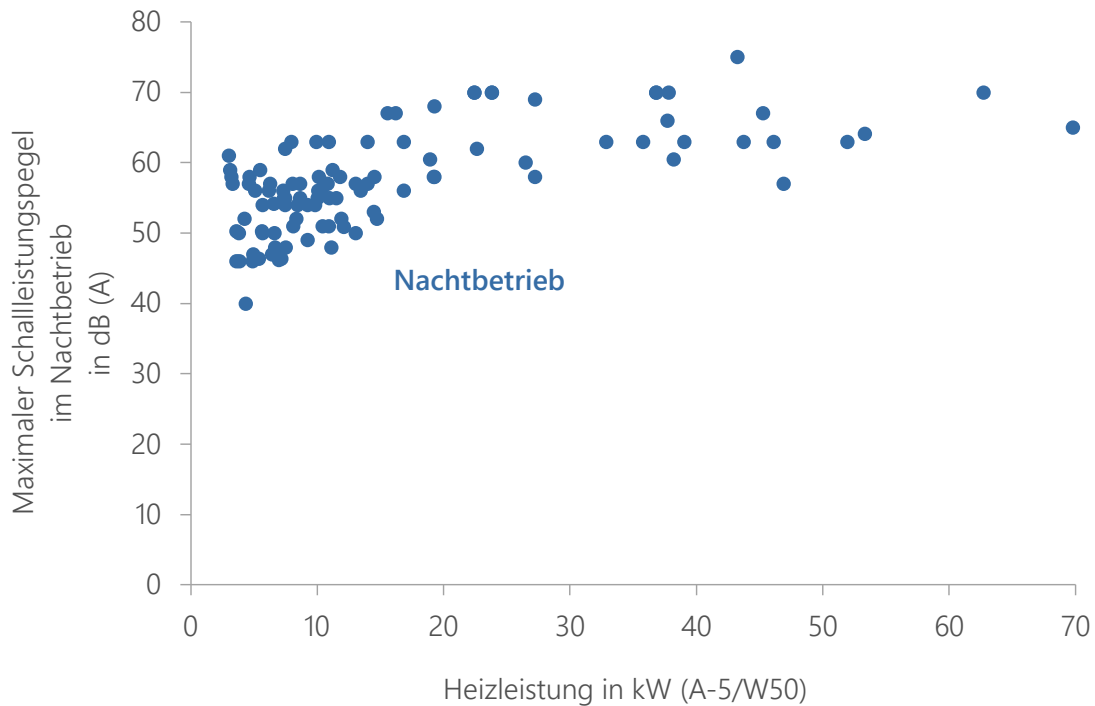


Abbildung 6-11: Nachtbetrieb: Schalleistungspegel zu Heizleistung (A-5/W50), eigene Berechnungen und Daten aus [118]

#### 6.2.4.2 Regressionsanalyse

Im Folgenden wird auf Basis der diskreten Werte (vgl. Abbildung 6-11) ein funktionaler Zusammenhang zwischen Schalleistungspegel und Heizleistung erstellt, um die mittlere Anlagencharakteristik auf beliebige Heizleistungen übertragen zu können. Kapitel 6.3.3 beschreibt zudem eine differenzierte Betrachtung von Anlagen mit vergleichsweise hohen und geringen Emissionen.

#### Wahl der Regressionsfunktion

Zur Abbildung der Werte aus Abbildung 6-11 werden verschiedene Regressionsfunktionen getestet. Zum Vergleich der Funktionen wird als Fehlermaß die normierte Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (engl. „normalized root mean square error“, kurz nRMSE) verwendet. Der nRMSE berechnet sich entsprechend Formel (6-3). Die Normierung erfolgt anhand der Differenz aus Maximal- und Minimalwert.

$$nRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (L_{w,aeq,i}^m - L_{w,aeq,i}^h)^2}{k}}}{(L_{w,aeq,max}^h - L_{w,aeq,min}^h)} \quad (6-3)$$

$nRMSE$	Normierte Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme
$L_{w,aeq}$	Schalleistungspegel der Luftwärmepumpe
$m$	Modellergebnis
$h$	Herstellerangabe
$i$	Laufindex der untersuchten Anlagen
$k$	Anzahl der untersuchten Anlagen (hier 102)
$max$	Maximalwert
$min$	Minimalwert

Eine lineare Funktion ist zur Repräsentation der Datenpunkte wenig geeignet, da die Steigung bei hohen Heizleistungen zu groß ist (nRMSE = 14,8 %). Eine aus zwei Geraden zusammengesetzte Funktion, welche Anlagen mit einer Heizleistung kleiner und größer 25 kW getrennt betrachtet ist passender (nRMSE = 14,2 %). Ein marginal geringeres Fehlermaß (nRMSE = 14,1 %) lässt sich mit der Logarithmusfunktion  $6,1934 \ln(x) + 42,093$  erreichen. Ein weiterer Vorteil der Logarithmusfunktion gegenüber der zusammengesetzten Funktion ist die Differenzierbarkeit, die zur Herstellung eines funktionalen Zusammenhangs (siehe Kapitel 6.2.5) von Vorteil ist.

Abbildung 6-12 zeigt das Ergebnis der Regressionsanalyse.

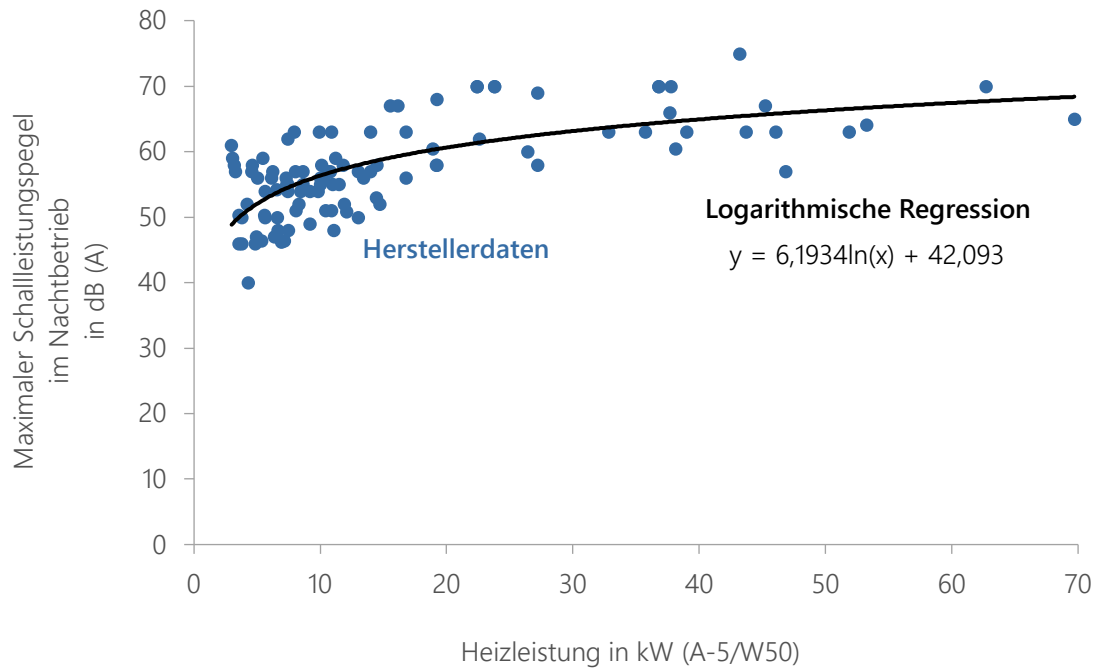


Abbildung 6-12: Funktionaler Zusammenhang von Schalleistungspegel und Heizleistung, eigene Berechnungen und Daten aus [118]

### Varianten zur Höhe der Schallemissionen

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse werden Anlagen mit geringen und hohen Schallemissionen differenziert betrachtet. Hierzu werden die Datenpunkte ober- und unterhalb der schwarz gestrichelt dargestellten Regressionsfunktion nach Abbildung 6-12 unterschieden. Diese lassen sich ebenfalls durch jeweils eine Logarithmusfunktion repräsentieren (siehe Abbildung 6-13).

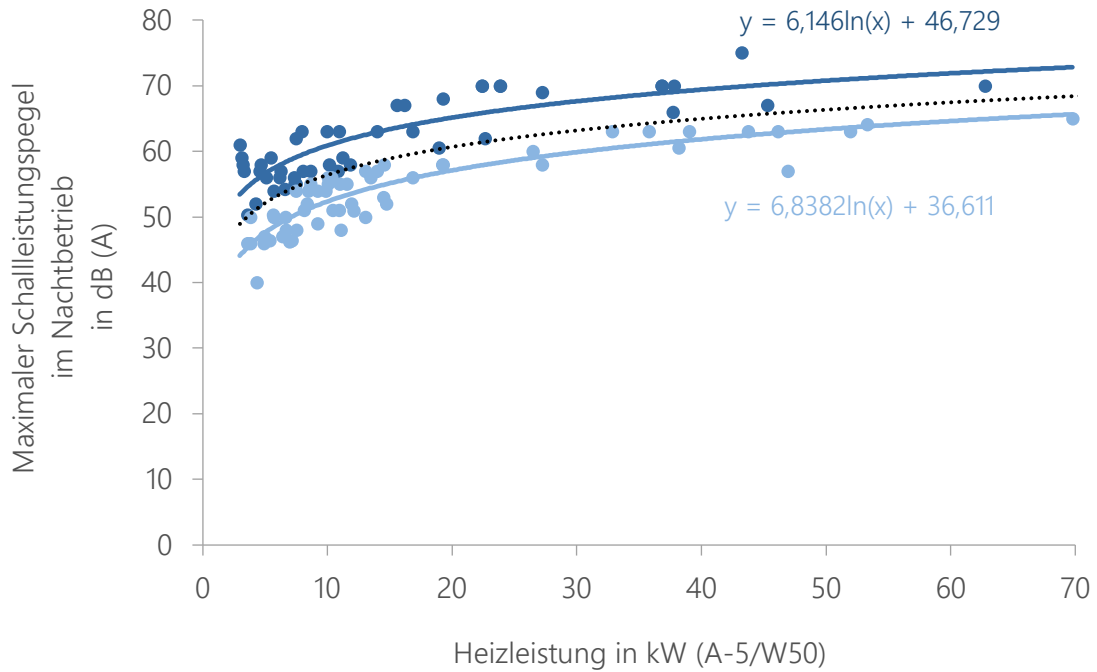


Abbildung 6-13: Differenzierung von Anlagen mit hohen und geringen Schallleistungspegel im Nachtbetrieb, eigene Berechnungen und Daten aus [118]

Bis 25 kW Heizleistung existieren jeweils für alle drei Aufstellungsvarianten Anlagen mit geringen, mittleren und hohen Schallemissionen. Im Bereich über 25 kW sind die Schallemissionen von Anlagen in Splitaufstellung tendenziell geringer als die in Außenaufstellung. Eine nach Bauart differenzierte Untersuchung (vgl. Abbildung 6-14) erfolgt aufgrund der unzureichenden Abdeckung des gesamten Wertebereichs und der hohen Streuung innerhalb der Kategorien nicht.

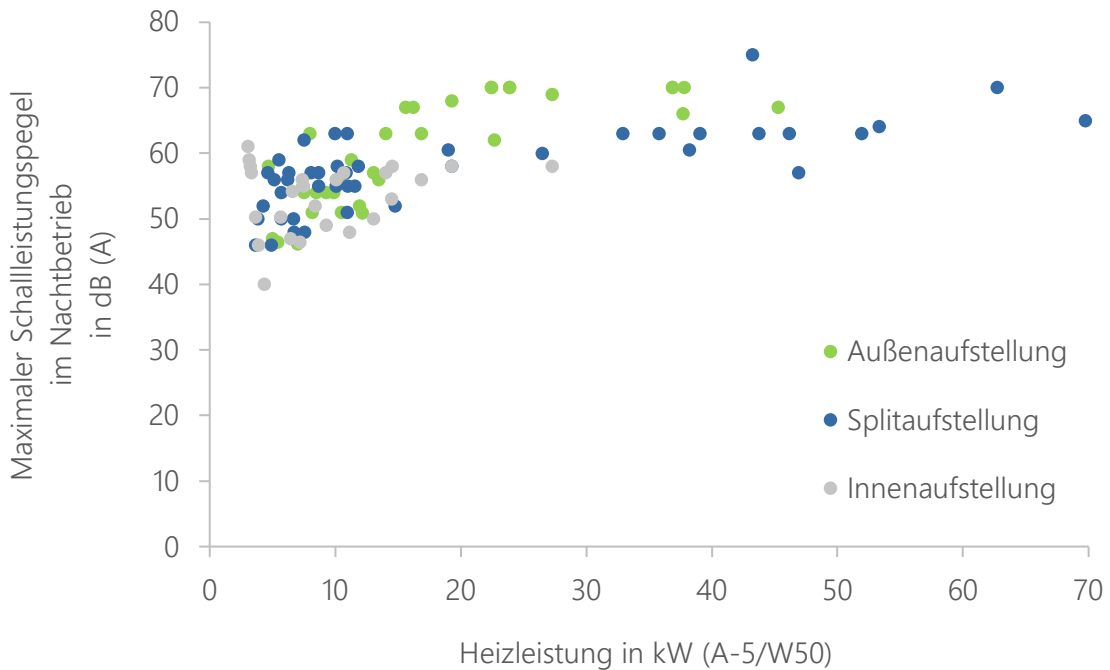


Abbildung 6-14: Differenzierung des Schallleistungspegels nach Bauart im Nachtbetrieb, eigene Berechnungen und Daten aus [118]



### 6.2.5 Wärmeenergieangebot

Das Wärmeenergieangebot wird berechnet durch die Multiplikation der maximalen Heizleistung mit den angesetzten Volllaststunden. Diese Heizleistung wird auf Basis des limitierenden Abstands (siehe Kapitel 6.2.2) und dem im Folgenden aufgestellten funktionalen Zusammenhang berechnet.

Die Abnahme des Schalldruckpegels über die Entfernung von Emissions- zum Immissionsort berechnet sich nach [50] auf Basis von [49] entsprechend Formel (6-4)<sup>2</sup>.

$$L_r = L_{w,aeq} + K_T + K_0 - \left(20 * \lg\left(\frac{s_m}{1 \text{ m}}\right)\right) dB(A) - 11dB(A) + K_R \quad (6-4)^2$$

$L_r$	Beurteilungspegel in dB(A)
$L_{w,aeq}$	Schalleistungspegel der Wärmepumpe in dB(A)
$K_T$	Zuschlag für die Ton- und Informationshaltigkeit nach Herstellerangabe in dB(A)
$K_0$	Raumwinkelmaß entsprechend Aufstellungssituation (vgl. Abbildung 6-7) in dB(A)
$s_m$	Entfernung der Schallquelle zum maßgeblichen Immissionsort in m
$-11dB(A)$	Äquivalenter Schalldruckpegel auf der Oberfläche einer Kugel mit Radius 1 m
$K_R$	Zuschlag von 6 dB(A) für Zeiten mit erhöhter Empfindlichkeit (im Tagbetrieb)

Wie in Kapitel 6.2.4.2 beschrieben wird für die Beschreibung des Schalleistungspegel in Abhängigkeit der Heizleistung eine logarithmische Funktion verwendet (siehe Formel (6-5)).

$$L_{w,aeq} = a * \ln(\dot{Q}_{LWP}) + b \quad dB(A) \quad (6-5)$$

$\dot{Q}_{LWP}$	Heizleistung der Luftwärmepumpe bei A-5/W50 in kW
$a$	Funktionsparameter a
$b$	Funktionsparameter b

Durch Einsetzen von Formel (6-5) in Formel (6-4) und Umstellung nach  $\dot{Q}_{LWP}$  ergibt sich Formel (6-6).

$$\dot{Q}_{LWP} = e^{\frac{L_r - K_T - K_0 + 20 * \lg\left(\frac{s_m}{1 \text{ m}}\right) + 11 - K_R - b}{a}} \quad kW \quad (6-6)$$

$K_R$  ist für den Nachtbetrieb nicht relevant und  $K_T$  ist in diesem Fall bereits in  $L_{w,aeq}$  berücksichtigt, weshalb diese aus der Gleichung entfernt werden können. Für  $a$  und  $b$  werden die Werte der Regressionsanalyse (siehe Kapitel 6.2.4.2) eingesetzt. Der Beurteilungspegel  $L_r$  muss den gewählten Immissionsrichtwert von 35 dB(A) um 6 dB(A) unterschreiten, sodass die Anlage nach [49] nicht relevant für den Schallschutznachweis ist. Auf diese Weise lässt sich Formel (6-7) berechnen:

$$\dot{Q}_{LWP} = e^{\frac{20 * \lg\left(\frac{s_m}{1 \text{ m}}\right) - 2,093 - K_0}{6,1934}} \quad kW \quad (6-7)$$

<sup>2</sup> Darstellung in Anlehnung an [113]

### Funktionaler Zusammenhang

Durch Einsetzen des Raumwinkelmaßes entsprechend der Aufstellungssituation (vgl. Abbildung 6-7) in Formel (6-7) ergibt sich der funktionale Zusammenhang zwischen limitierendem Abstand und Heizleistung. Abbildung 6-15 zeigt für die drei möglichen Aufstellorte den funktionalen Zusammenhang zwischen Entfernung und Heizleistung auf Basis der beschriebenen Eingangsdaten, Vorgehensweise und Annahmen.

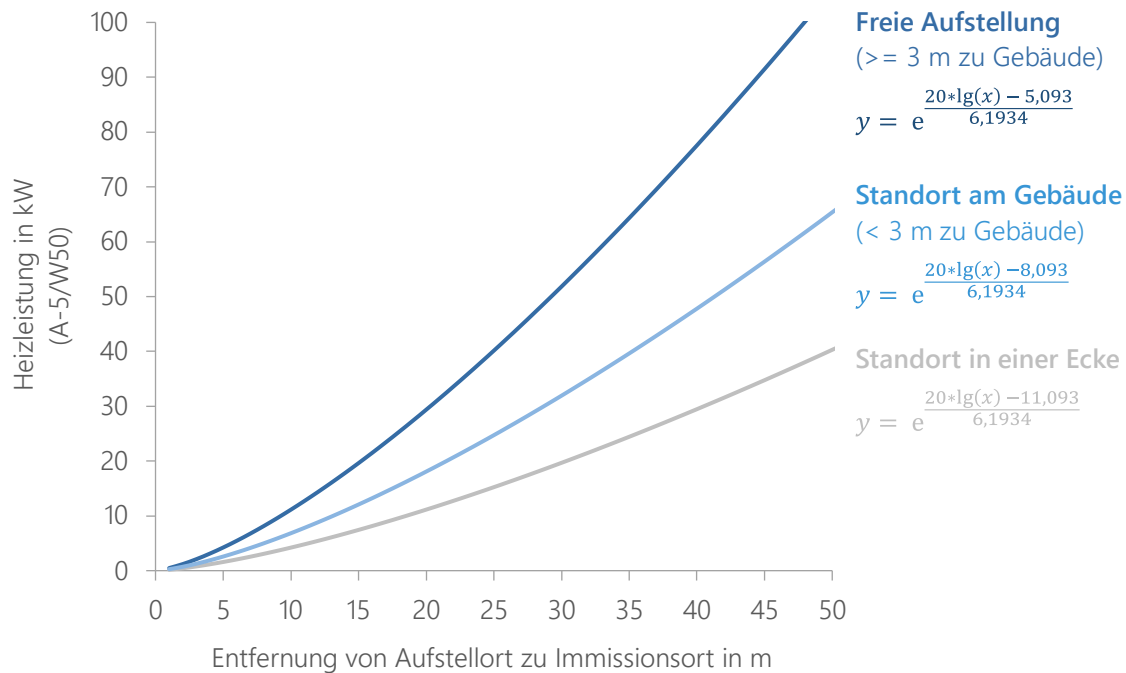


Abbildung 6-15: Funktionaler Zusammenhang zwischen Entfernung von Emissions- zu Immissionsort und Heizleistung (A-5/W50) unter Einhaltung der Schallschutzanforderungen bei einem Immissionsrichtwert (Nacht) von 35 dB(A)

Anhand dieses funktionalen Zusammenhangs und dem ermittelten limitierenden Abstand (vgl. Kapitel 6.2.2) kann die mögliche Heizleistung je Gebäude berechnet werden. Dabei wird angenommen, dass die Leistungsreduktion von Luftwärmepumpen von  $-5$  °C bis zur Normaußentemperatur vom elektrischen Heizstab kompensiert wird. Mit den angesetzten Volllaststunden (vgl. Kapitel 5.2.2) kann das Wärmeenergieangebot ermittelt werden. Durch Gegenüberstellung von Wärmeenergiebedarf (vgl. Kapitel 4) und Wärmeenergieangebot je Gebäude wird der Anteil der geeigneten Gebäude bzw. das Potenzial von Luftwärmepumpen berechnet.

## 6.3 Ergebnisse

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse zur Ermittlung des Potenzials von Luftwärmepumpen zusammengefasst. Die Definition der Boxplots ist zu Beginn von Kapitel 4.3 aufgeführt.

### 6.3.1 Zwischenergebnisse

Zur Ermittlung des Potenzials von Luftwärmepumpen wird anhand des in Kapitel 6.2.2.3 beschriebenen Modells der limitierende Abstand geometrisch ermittelt und damit das Wärmeenergieangebot quantifiziert.

#### Limitierender Abstand

Abbildung 6-16 zeigt die statistische Auswertung des limitierenden Abstands für den mittleren Aufstellort (vgl. Tabelle 6-3) je Gebäudetyp anhand von Boxplots. Diese Analyse bezieht sich auf 16,7 Mio. der insgesamt 17,1 Mio. Wohngebäude, da knapp 0,4 Mio. Wohngebäude im Umkreis von 50 m kein benachbartes Wohngebäude aufweisen. Aufgrund von Ausreißern (siehe rechte Antenne) wird nicht der Mittelwert, sondern der Median zur Interpretation der Ergebnisse herangezogen.

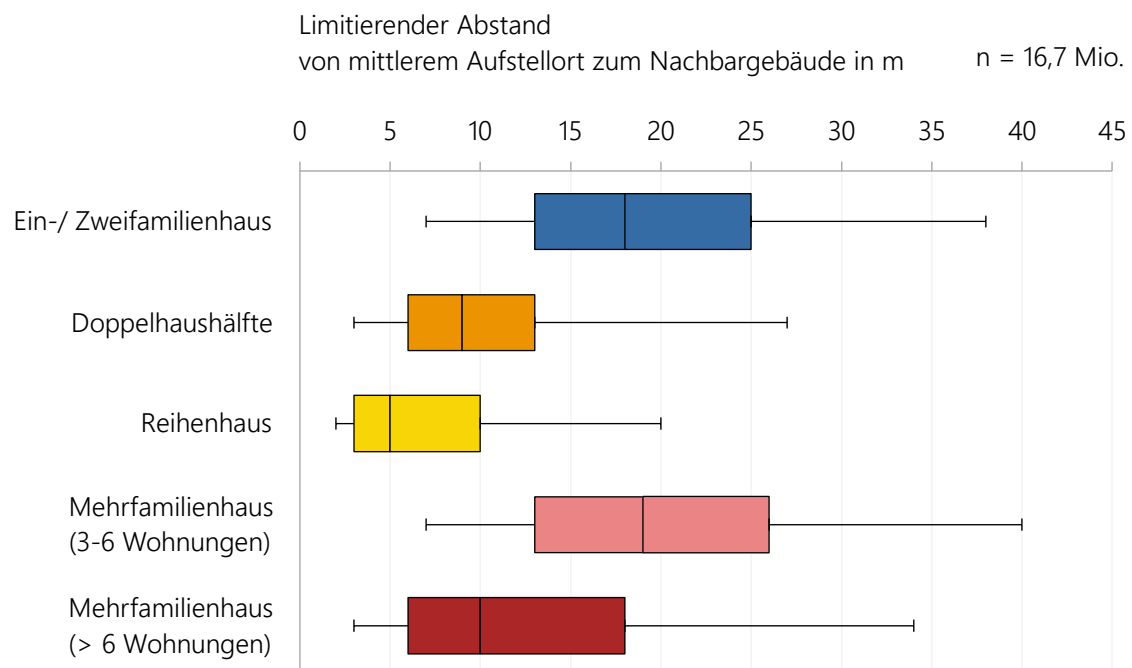


Abbildung 6-16: Limitierender Abstand vom mittleren Aufstellort zum Nachbargebäude je Gebäudetyp

Die größten Abstände zwischen Emissions- und Immissionsorten lassen sich in Ein-/Zweifamilienhäusern und kleinen Mehrfamilienhäusern realisieren. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass es sich entsprechend der Definition der Gebäudetypenklassen um freistehende Gebäude handelt. Der Median liegt in diesen Klassen bei 18 bzw. 19 m. Diese Werte deuten ebenfalls auf eine geringe Bebauungsdichte und somit günstige Bedingungen für Luftwärmepumpen hin. Doppelhaushälften weisen durch ihre Bauform einen geringeren Median von 9 m auf. Für Reihenhäuser ist dieser Abstand noch geringer und beträgt 5 m. In großen Mehrfamilienhäusern ist mit 10 m ein im Verhältnis zum hohen Wärmeenergiebedarf geringer Abstand vorhanden.

## Wärmeenergieangebot

Berechnet aus dem limitierenden Abstand (vgl. Abbildung 6-16), dem funktionalen Zusammenhang von Abstand zu Heizleistung (vgl. Abbildung 6-15) sowie den Volllaststunden ergibt sich das Wärmeenergieangebot von Luftwärmepumpen, welches in Abbildung 6-17 je Gebäudetyp als Boxplots dargestellt ist. Diese Auswertung umfasst auch die 0,4 Mio. Wohngebäude, in deren direktem Umfeld sich kein benachbartes Wohngebäude befindet.

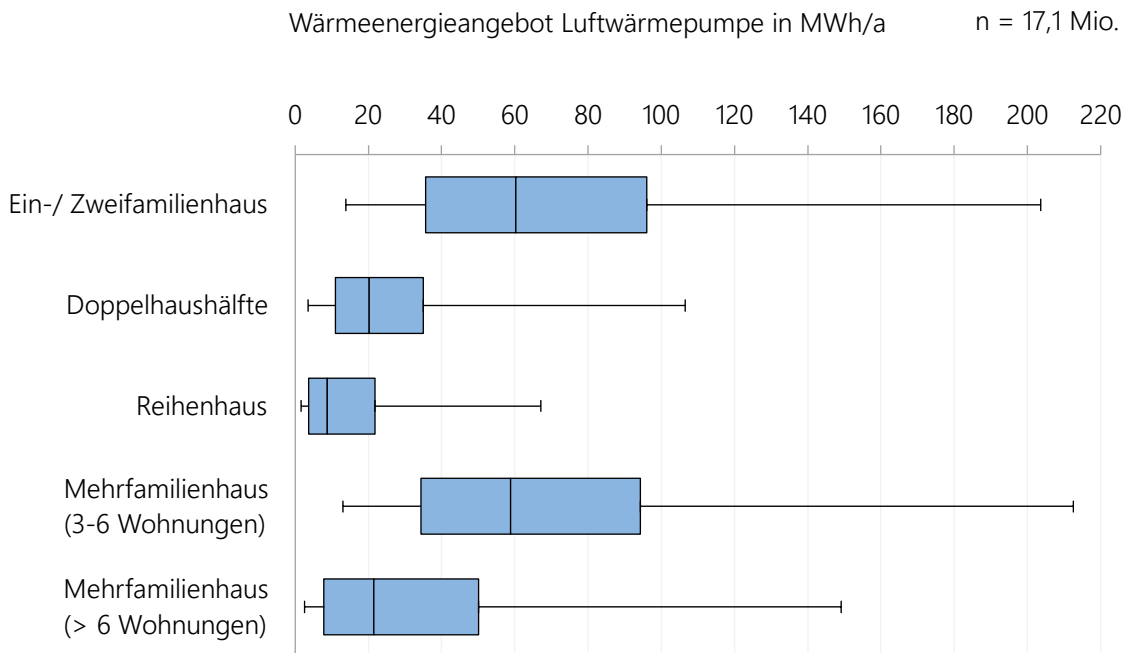


Abbildung 6-17: Wärmeenergieangebot Luftwärmepumpe je Gebäudetyp (mittlerer Aufstellort)

Die in Abbildung 6-17 gezeigte Charakteristik des Wärmeenergieangebots je Gebäudetyp ähnelt der des limitierenden Abstands: Ein-/Zweifamilienhäuser und kleine Mehrfamilienhäuser weisen höhere Wärmeenergieangebote als große Mehrfamilienhäuser, Doppelhäuser oder Reihenhäuser auf.

Anhand des Wärmeenergiebedarfs wird das Potenzial für Luftwärmepumpen berechnet, welches im nächsten Abschnitt ausgewertet ist.

### 6.3.2 Potenzial von Luftwärmepumpen

Das in Kapitel 6.2 beschriebene Luftwärme-Modell liefert folgendes Kernergebnis:

65 % der 17,1 Mio. analysierten Gebäude sind für eine Luftwärmepumpe geeignet.

Dieses technische Potenzial wird durch den Vergleich von Wärmeenergiebedarf (vgl. Kapitel 4) und Wärmeenergieangebot von Luftwärmepumpen je Wohngebäude ermittelt (vgl. Formel (3-1)).

Im Folgenden ist dieses Potenzial nach Gebäudetyp, Landkreis, Stadt- bzw. Gemeindetyp und spezifischem Wärmeenergiebedarf differenziert dargestellt. Neben dem Potenzial ist auch der bereitstellbare Anteil des Wärmeenergiebedarfs ausgewiesen.

#### Potenzial je Gebäudetyp

Abbildung 6-18 zeigt das Potenzial für Luftwärmepumpen differenziert nach den fünf analysierten Gebäudetypen.

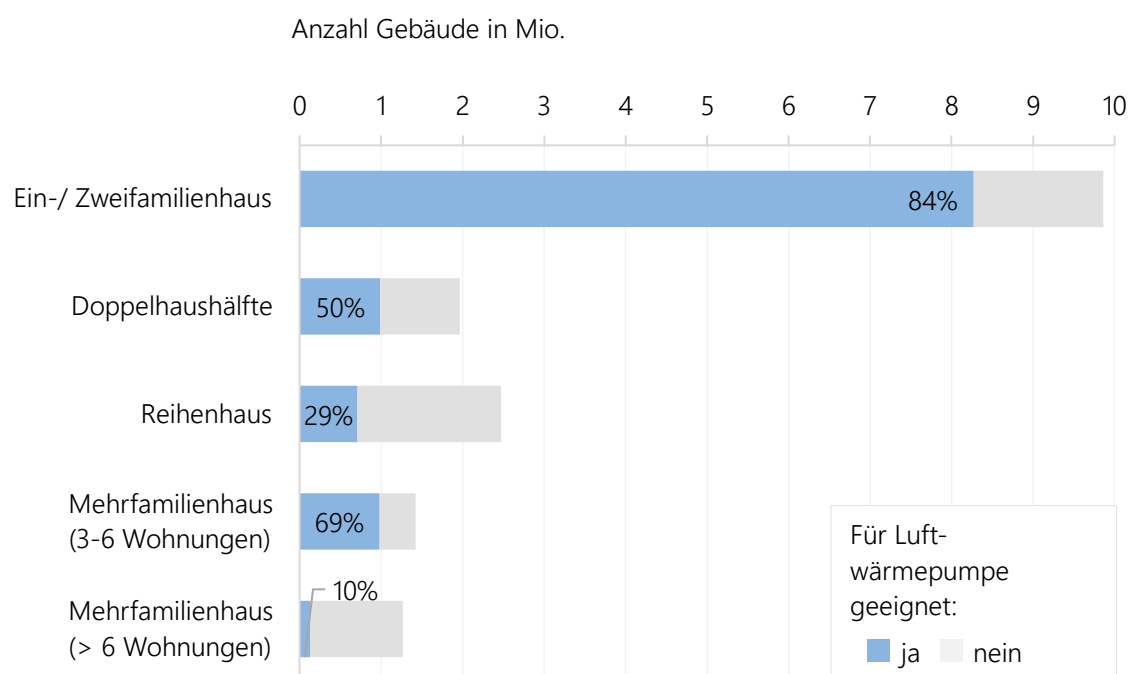


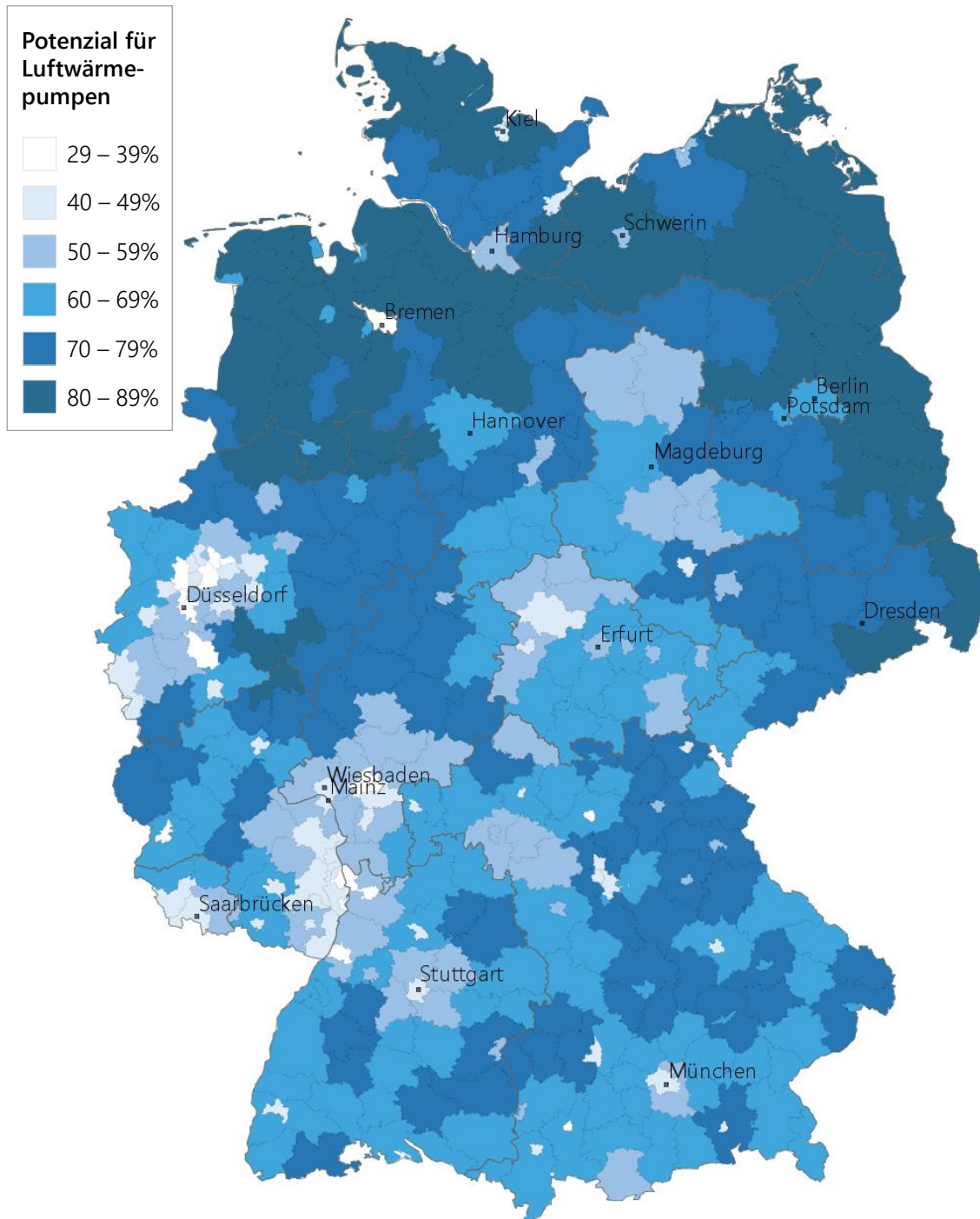
Abbildung 6-18: Potenzial für Luftwärmepumpen je Gebäudetyp (mittlerer Aufstellort)

Bei vergleichbarem Wärmeenergieangebot (vgl. Abbildung 6-17) fällt der Anteil der für Luftwärmepumpen geeigneten Ein-/Zweifamilienhäuser mit 84 % höher aus als der von kleinen Mehrfamilienhäusern mit 69 %. Dies ist auf den höheren Wärmeenergiebedarf kleiner Mehrfamilienhäuser zurückzuführen (vgl. Abbildung 4-22). Nach relativem Anteil sortiert folgen daraufhin die Doppelhaushälften mit 50 %, Reihenhäuser mit 29 % und große Mehrfamilienhäuser mit 10 %.

In absoluten Zahlen entspricht dies 8,3 Mio. Ein-/Zweifamilienhäusern, 1,0 Mio. Doppelhaushälften, 1,0 Mio. kleinen Mehrfamilienhäusern, 0,7 Mio. Reihenhäusern und lediglich 0,1 Mio. großen Mehrfamilienhäusern die anhand von Luftwärmepumpen mit Wärme versorgt werden können. Dies verdeutlicht die hohe Relevanz der Ergebnisse für die hohe Anzahl an Ein-/Zweifamilienhäusern. Abbildung 6-22 zeigt die Aufteilung nach bereitstellbarem Wärmeenergiebedarf und Gebäudetyp, um die Rolle der Mehrfamilienhäuser differenzierter zu beleuchten.

### Potenzial je Landkreis

Weiter wird die räumliche Verteilung des Luftwärmepumpen-Potenzials analysiert. Abbildung 6-19 zeigt das Potenzial für Luftwärmepumpen je Landkreis.



Administrative Grenzen: © GeoBasis-DE / BKG-2017 | Generalisierung FfE

Abbildung 6-19: Potenzial für Luftwärmepumpen je Landkreis (mittlerer Aufstellort)

Es fällt auf, dass das Potenzial für Luftwärmepumpen in Ballungsgebieten wie beispielsweise den Landeshauptstädten deutlich geringer ausfällt als in vorstädtischen und ländlichen Gebieten. Dabei nimmt das Potenzial auch an den Rändern von Großstädten bereits deutlich zu. Bezüglich des ländlichen Raums ist das Potenzial in Norddeutschland größer als im süddeutschen Raum. Dies ist

auf den Einfluss des Klimas auf den benötigten Wärmeenergiebedarf bzw. die Heizleistung und Unterschiede in der Siedlungsdichte zurückzuführen.

### Potenzial je Stadt- bzw. Gemeindetyp

Das Potenzial wird entsprechend der Definition von [80] je Stadt- bzw. Gemeindetyp aggregiert, um Unterschiede zwischen Stadt und Land greifbar darzustellen (vgl. Abbildung 6-20).

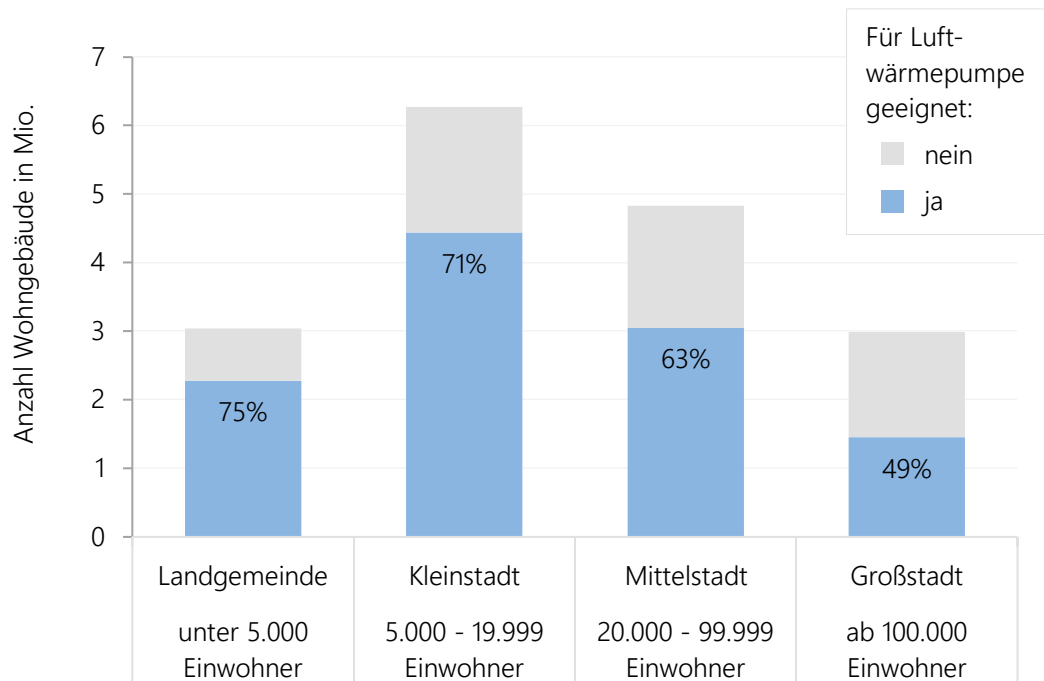


Abbildung 6-20: Potenzial für Luftwärmepumpen je Stadt- bzw. Gemeindetyp

Demnach sind in Landgemeinden Dreiviertel der Wohngebäude für Luftwärmepumpen geeignet, in Kleinstädten 71 %, in Mittelstädten 63 % und in Großstädten 49 %. Bei diesen relativen Angaben für die Stadttypen ist die Verteilung der Gebäude bzw. des Wärmeenergiebedarfs zu beachten. Die absolute Anzahl der Gebäude zeigt, dass Klein- und Mittelstädte stärker als Großstädte und Landgemeinden vertreten sind.

### Potenzial in Abhängigkeit des spezifischen Wärmeenergiebedarfs

Grundsätzlich stellt der spezifische Wärmeenergiebedarf keine grundlegende technische Limitierung für den Einsatz oder die Effizienz von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden dar (vgl. Kapitel 5.2.1). Die Höhe des Wärmeenergiebedarfs und damit auch die Höhe des Stromverbrauchs hingegen hängen auch vom spezifischen Wärmeenergiebedarf ab. Gebäude mit hohem spezifischem Wärmeenergiebedarf weisen i. d. R. ein entsprechendes Baualter z. B. vor 1979 auf (vgl. Kapitel 4.2.3). Nachfolgend wird untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen spezifischem Wärmeenergiebedarf und der Höhe des Potenzials besteht (vgl. Abbildung 6-21).

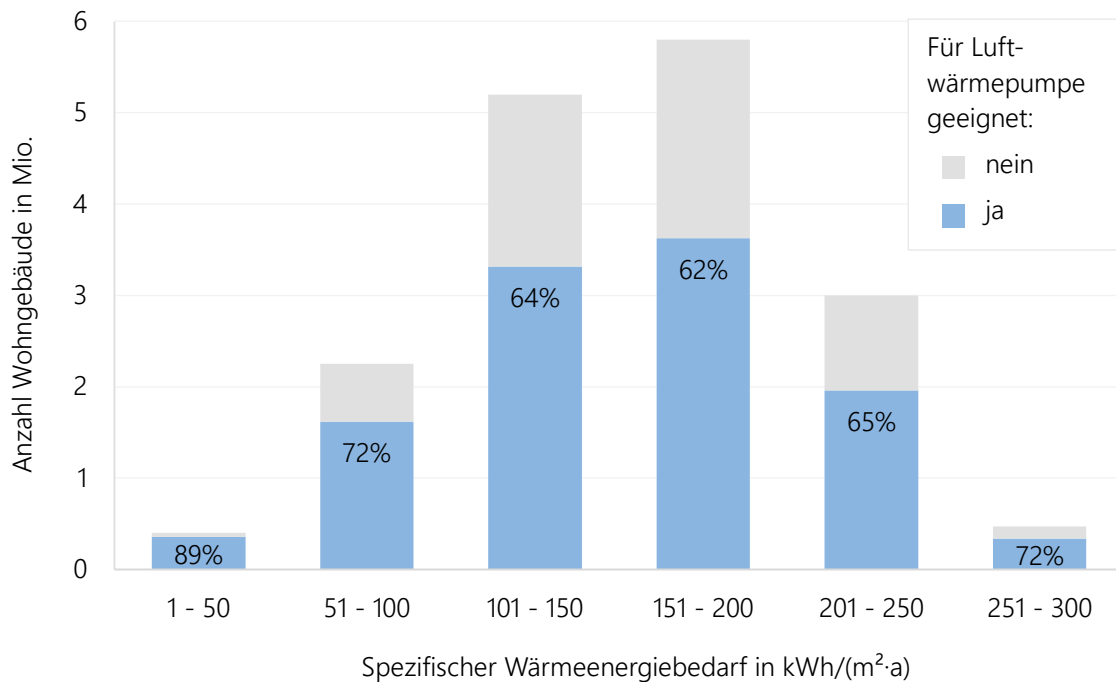


Abbildung 6-21: Potenzial für Luftwärmepumpen in Abhängigkeit des spezifischen Wärmeenergiebedarfs

Abbildung 6-21 zeigt, dass die Anteile der für Luftwärmepumpen geeigneten Gebäude sich zwischen 62 bis 89 % bewegen. Dieser Anteil ist im Intervall von 1 – 50 kWh/(m<sup>2</sup>·a) am größten, nimmt schrittweise bis 151 – 200 kWh/(m<sup>2</sup>·a) auf 62 % ab und steigt erneut bis auf 72 % im Intervall von 251 – 300 kWh/(m<sup>2</sup>·a) an. Demnach ist lediglich ein geringfügiger Effekt des spezifischen Wärmeenergiebedarfs auf das Potenzial erkennbar, welcher durch andere Effekte überlagert wird. Den größten Einfluss hat diesbezüglich der Gebäudetyp. Vor allem Einfamilienhäuser weisen Werte von über 200 kWh/(m<sup>2</sup>·a) auf (vgl. Abbildung 4-23), sind jedoch vielfach für Luftwärmepumpen geeignet (vgl. Abbildung 6-18). Die Auswertung des limitierenden Abstands nach den Kategorien von Abbildung 6-21 zeigte zudem, dass Gebäude mit hohem spezifischen Wärmeenergiebedarf häufiger in Gebieten mit größerem Abstand zwischen Gebäuden bzw. geringerer Bebauungsdichte vorkommen, sodass der höhere Bedarf an Wärmeenergie durch ein höheres Angebot überkompensiert wird.



### Bereitstellbarer Wärmeenergiebedarf

Neben dem Anteil der Gebäude, die für Luftwärmepumpen geeignet sind, ist im Folgenden der durch Luftwärmepumpen bereitstellbare Wärmeenergiebedarf ausgewertet. Analog zur Definition des Potenzials (vgl. Kapitel 3.1) sind in dieser Analyse lediglich Gebäude berücksichtigt, die anhand einer Luftwärmepumpe und dem zugehörigen elektrischen Heizstab vollständig mit Wärme versorgt werden können.

Bezogen auf alle untersuchten Wohngebäude können 55 % des gesamten Wärmeenergiebedarfs anhand von Luftwärmepumpen bereitgestellt werden. Dies sind 10 Prozentpunkte weniger als nach Anzahl der Gebäude bewertet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Gebäude einer Klasse mit einem geringen Wärmeenergiebedarf eher für Luftwärmepumpen geeignet sind. Dieser Effekt kommt in den Gebäudetypklassen unterschiedlich stark zum Tragen (vgl. Abbildung 6-22).

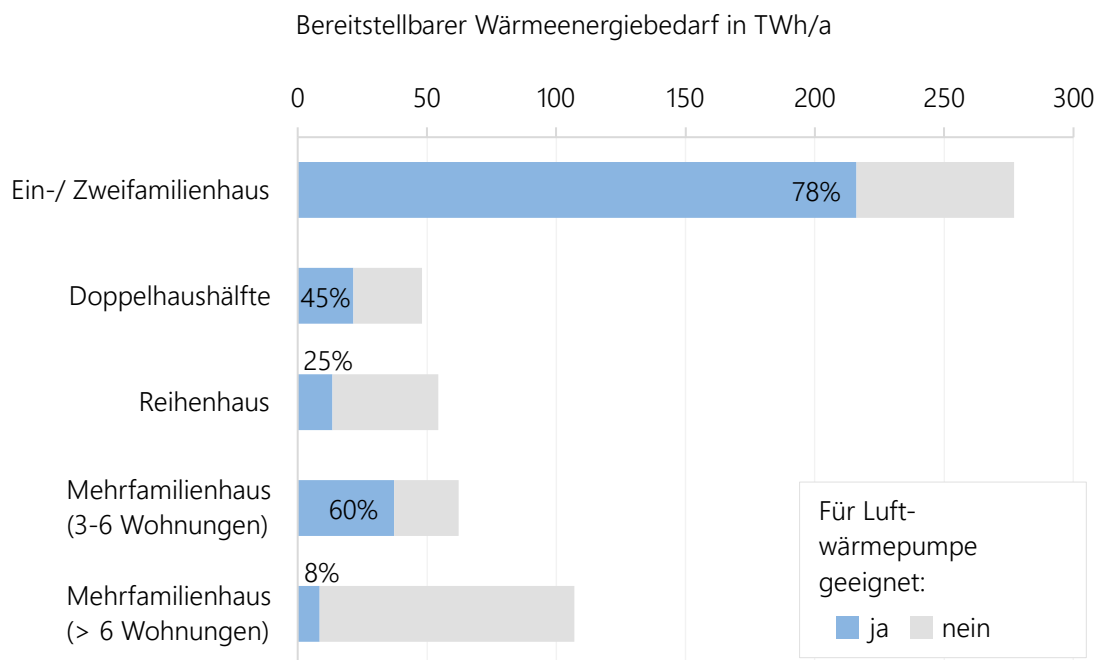


Abbildung 6-22: Bereitstellbarer Wärmeenergiebedarf durch Luftwärmepumpen je Gebäudetyp

Für große Mehrfamilienhäuser fällt der Anteil des bereitstellbaren Wärmeenergiebedarfs im Vergleich zum Anteil der durch Luftwärmepumpen mit Wärme versorgbaren Gebäude mit -24 % relativ gesehen am stärksten. Dies liegt an der großen Bandbreite bzgl. des Wärmeenergiebedarfs in dieser Klasse (vgl. Abbildung 4-22). Der Anteil des bereitstellbaren Wärmeenergiebedarfs aller Ein-/Zweifamilienhäuser beträgt 78 %, was im Vergleich zum Anteil der Gebäude eine Reduktion von 7 % bedeutet. Der Rückgang in den weiteren Gebäudetypklassen liegt relativ gesehen zwischen diesen Extrema.

### 6.3.3 Sensitivitätsanalyse

Zur Einordnung des Einflusses von in der Praxis vorkommenden Parametervariationen auf das Ergebnis, wird die nachfolgend beschriebene Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die in Kapitel 6.3.1 und 6.3.2 aufgeführten Ergebnisse dienen dabei als Referenz. In jeder Variante wird im Vergleich zur Referenz ein Parameter verändert.

#### Varianten zum Aufstellort

Bezüglich des Aufstellorts der Anlage werden als Alternative zum mittleren Aufstellort der optimale und der ungünstigste Aufstellort jeweils in 3 m Abstand zum Gebäude untersucht. Zudem wird der Standort in direkter Nähe zum Gebäude (0,5 m) analysiert, da derartige Aufstellorte in der Praxis teilweise gewählt werden. Abbildung 6-23 zeigt jeweils das Potenzial dieser drei Varianten in Relation zur Referenz, in dem das Potenzial 65 % beträgt.

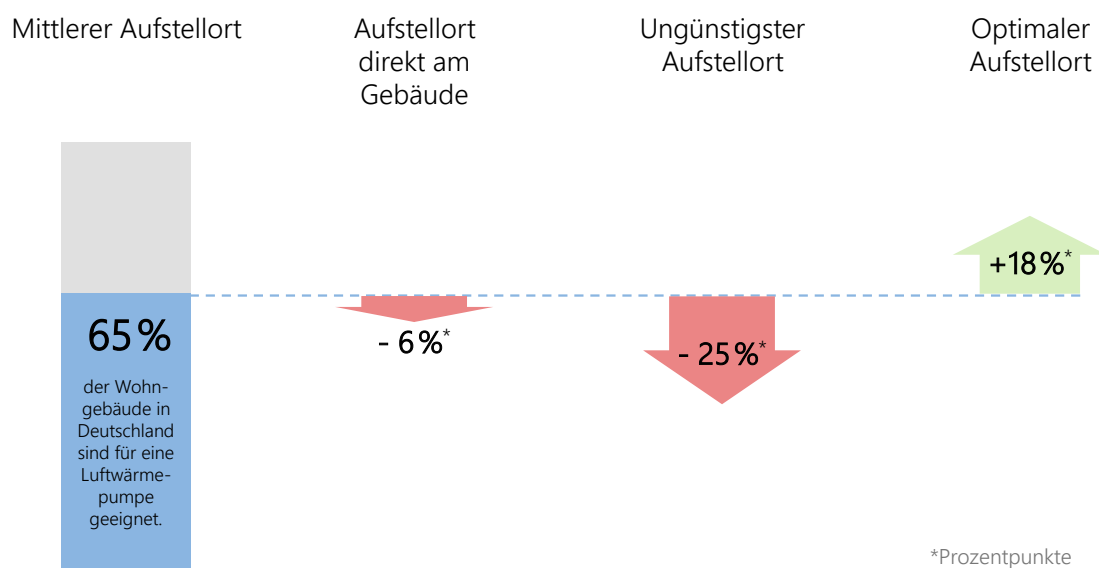


Abbildung 6-23: Potenzial für Luftwärmepumpen – Varianten des Anlagenstandorts

Erfolgt die Aufstellung gebäudenah, dann resultiert dies in einer Reduktion des Potenzials von 6 Prozentpunkten. Hier zeigt sich, dass die Vergrößerung des limitierenden Abstands um 2,5 m weniger Einfluss auf das Potenzial hat als die Erhöhung des Raumwinkelmaßes um 3 dB(A). Wird jeweils der ungünstigste Aufstellort gewählt reduziert sich das Potenzial um 25 Prozentpunkte. Die Verwendung des optimalen Aufstellorts je Gebäude resultiert in einer Potenzialerhöhung von 18 Prozentpunkten. Diese Extremfälle zeigen durch die große Differenz zwischen 40 % und 83 %, dass die Auswahl des Aufstellorts einen relevanten Einfluss auf das Potenzial von Luftwärmepumpen hat. Auch wenn dies die Höhe des Wärmeangebots im Einzelfall deutlich verändern kann, ist es unrealistisch, dass für alle Gebäude nur der optimale bzw. der ungünstigste Aufstellort in Frage kommt. Aus diesem Grund wurde der mittlere Aufstellort als Referenz definiert.

### Varianten zu Schallemissionen

Hinsichtlich der Schallemissionen von Luftwärmepumpen werden zwei Varianten untersucht: höhere und niedrigere Emissionen als im Mittel (vgl. Abbildung 6-13). Das Ergebnis ist in Abbildung 6-24 dargestellt.

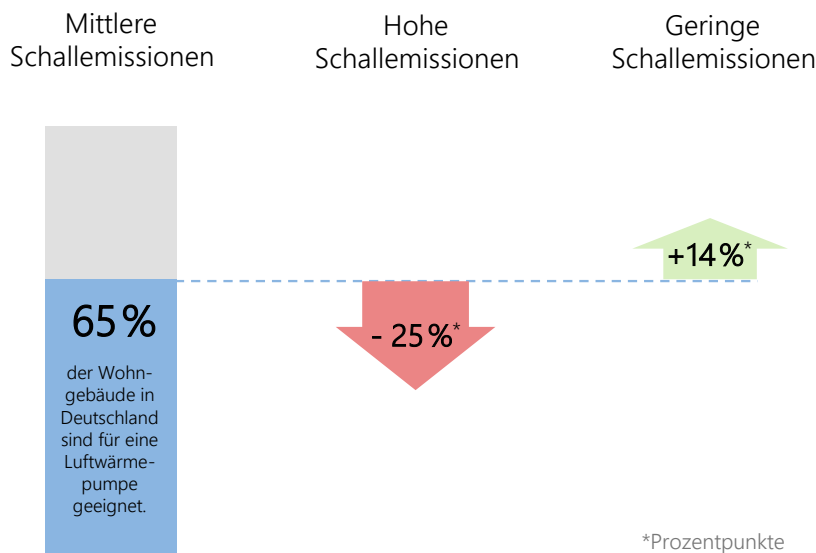


Abbildung 6-24: Potenzial Luftwärmepumpen – Varianten zur Höhe der Schallemissionen

Unter der Annahme, dass ausschließlich Anlagen mit hohen Schallemissionen zum Einsatz kommen, reduziert sich das Potenzial um 25 Prozentpunkte. Werden hingegen nur Anlagen mit geringen Schallemissionen verwendet, steigt das Potenzial im Vergleich zur Referenz um 14 Prozentpunkte auf 79 % an.

Im Zeitraum von Mitte des Jahres 2020 bis Mitte des Jahres 2022 wurden 17 Anlagen mit überdurchschnittlichen Schallemissionen aus dem Schallrechner [118] entfernt und durch aktuelle Produkte ersetzt. Dies zeigt einerseits, die steigende Relevanz des Themas Schallemissionen am Markt und andererseits die Fortschritte in der Technologieentwicklung (vgl. auch [4]). Eine belastbare Quantifizierung dieser Entwicklung war im Rahmen dieser Arbeit aufgrund mangelnder Daten nicht möglich. Die in der Kategorie „geringe Schallemissionen“ repräsentierten Anlagen, die heute im Vergleich zum Mittelwert leiser arbeiten, könnten in Zukunft zum Standard der Branche werden.

### Wärmeenergiebedarf vs. Wärmeenergieangebot Luftwärme

Neben dem Referenzfall und den untersuchten Varianten wird nachfolgend das Verhältnis von Bedarf und Angebot analysiert. Abbildung 6-25 zeigt anhand der Ordinate den Anteil der Gebäude, deren Verhältnis von Wärmeenergiebedarf und Wärmeenergieangebot für Luftwärmepumpen (Referenzfall) kleiner gleich dem auf der Abszisse angegebenen Wert ist.

Ist das Verhältnis aus Bedarf und Angebot kleiner gleich dem Wert 1, dann entspricht dies der Definition des Potenzials (vgl. Kapitel 3.1). Der Anteil der Gebäude, der diesem Kriterium entspricht beträgt 65 %. D. h. für 65 % der Wohngebäude ist der Wärmeenergiebedarf kleiner gleich dem Wärmeenergieangebot.

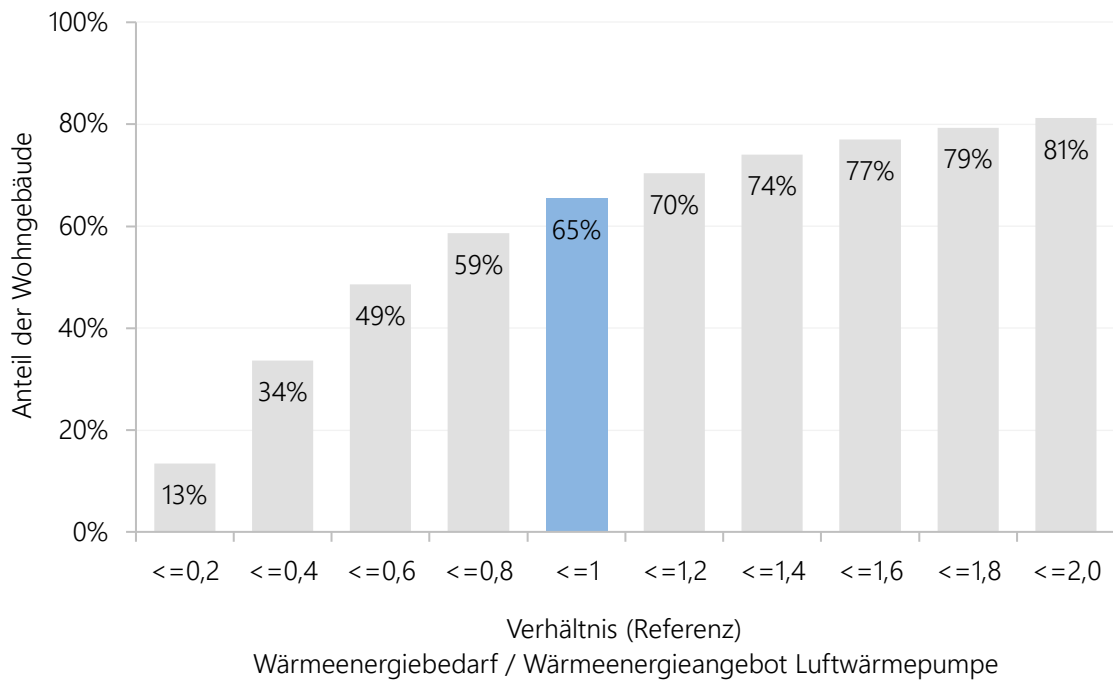


Abbildung 6-25: Anteil der Gebäude gegenüber dem Verhältnis von Wärmeenergiebedarf zu Wärmeenergieangebot Luftwärmepumpe

Die Robustheit des Potenzials lässt sich in Abbildung 6-25 durch die Veränderungen der Parameter Wärmeenergiebedarf und -angebot erkennen. Die auf der Abszisse angegebenen Intervalle links von „<=1“ zeigen für den Referenzfall die Höhe des Überangebots an Luftwärme und die Ordinate den entsprechenden Anteil der Gebäude. Intervalle rechts von „<=1“ beninhalten zudem Gebäude die in der Referenz ein Unterangebot für Luftwärmepumpen aufweisen.

Gebäude, die in Abbildung 6-25 den Intervallen „<=0,2“ bis „<=0,8“ zugeordnet sind, bleiben auch für Luftwärmepumpen geeignet, wenn durch Veränderung von Bedarf bzw. Angebot das resultierende Verhältnis weiterhin kleiner gleich 1 ist. Analog können auch Gebäude die in der Referenz ein Verhältnis größer 1 aufweisen für Luftwärmepumpen geeignet sein, falls der Bedarf geringer oder das Angebot höher als in der Referenz angenommen ist, sodass das resultierende Verhältnis kleiner gleich 1 ist.

Greifbarer werden die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse in Abbildung 6-25, wenn Hypothesen zur Veränderung des Bedarfs oder des Angebots an Wärmeenergie formuliert werden. Diese können z. B. so lauten:

- **Überdimensionierung:** Würden alle Luftwärmepumpen gegenüber der Referenz um 25 % überdimensioniert, dann wären nur noch diejenigen Gebäude für Luftwärmepumpen geeignet, welche in Abbildung 6-25 ein Verhältnis von kleiner gleich 0,8 (1 geteilt durch 1,25) aufweisen. Dies sind 59 % der Wohngebäude. Eine derartige Überdimensionierung hätte eine Reduktion des Potenzials um 6 Prozentpunkte zur Folge.
- **Gebäudedämmung:** Würden alle Wohngebäude gedämmt werden, deren Verhältnis in Abbildung 6-25 größer 1 und kleiner gleich 1,6 ist, sodass ihr Wärmeenergiebedarf nach der Dämmung kleiner gleich dem Wärmeenergieangebot für Luftwärmepumpen ist, dann würde sich das Potenzial auf 77 % erhöhen (abzulesen bei „<=1,6“). Dies würde einer Reduktion des Wärmeenergiebedarfs um maximal 37,5 % (0,6/1,6) entsprechen.

Auf diese Weise lassen sich auch weitere Hypothesen aufstellen bzw. Werte interpretieren.

## 6.4 Zwischenfazit

Das entwickelte Modell bewertet anhand von Geodaten die Einsatzmöglichkeiten von Luft-Wasser-Wärmepumpen automatisiert für 17,1 Mio. Wohngebäude unter Einhaltung der geltenden Schallschutzvorgaben. Hierbei werden rund um jedes Gebäude verschiedene Aufstellorte analysiert und so der Abstand zur Nachbarbebauung ermittelt. Dabei werden zweidimensionale geometrische Anordnungen berücksichtigt, die zur Abschirmung, Reflexion oder Beugung von Schall führen. Anhand einer Regressionsanalyse werden Herstellerdaten zu Schallemissionen und zur Heizleistung von Anlagen in einem funktionalen Zusammenhang abgebildet. So kann unter Annahme eines Immissionsrichtwerts für Schall die maximal installierbare Heizleistung bzw. anhand von Volllaststunden das Wärmeenergieangebot berechnet werden. Im Ergebnis sind 65 % der untersuchten Gebäude für eine Luftwärmepumpe geeignet. Dabei ist ein klarer Zusammenhang zwischen Bebauungsdichte und Potenzial feststellbar: In Landgemeinden ist ein höherer Anteil der Gebäude (75 %) geeignet als in Großstädten (49 %). Dies spiegelt sich auch in den Anteilen der Gebäudetypen über alle Stadttypen hinweg wider: Hier sind 84 % der Ein-/Zweifamilienhäuser, 69 % der Mehrfamilienhäuser (bis sechs Wohneinheiten), 50 % der Doppelhaushälften, 29 % der Reihenhäuser und 10 % der Mehrfamilienhäuser (mehr als sechs Wohneinheiten) geeignet.

Folgende Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des Modells wurden identifiziert: Mangels frei und bundesweit verfügbarer Daten zu Grundstücken werden Baulücken im Luftwärme-Modell nicht berücksichtigt, da diese nicht als relevante Immissionsorte identifiziert werden. Dies führt punktuell zur Überschätzung des Potenzials ebenso wie Gebäude, die nicht in den Daten von OpenStreetMap erfasst sind. Demgegenüber werden zum Teil auch Nichtwohngebäude wie große Garagen als Wohngebäude interpretiert, was eine stellenweise Unterschätzung des Potenzials zur Folge hat. Um praxisnahe Ergebnisse zu erhalten, wurden straßennahe Aufstellorte priorisiert und nicht der optimale, sondern der mittlere Standort ausgewählt. Ob dies repräsentativ ist und auch subjektive Kriterien – wie die Gestaltung des Vorgartens bzw. Eingangsbereichs o. ä. – damit treffend abgebildet werden, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht validiert werden. Ferner könnten bisher seltener realisierte Aufstellorte für Luftwärmepumpen wie auf dem Dach oder der Garage im Modell untersucht werden. Aus technischer Sicht können auch Schallschutzmaßnahmen wie die Einhausung der Außeneinheit in Betracht gezogen werden. Weiter könnte eine Zunahme von Produkten mit einer Heizleistung über 20 kW die Belastbarkeit der Regressionsanalyse erhöhen und ggf. eine nach Bauart differenzierte Bewertung ermöglichen. Überdies könnte die konservative Annahme bzgl. der Schallimmissionsrichtwerte differenziert werden, wobei neben den rechtlichen Vorgaben auch die Akzeptanz der Technologie zu beachten ist.

Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigt, welche Auswirkungen die Variation von Eingangsparametern auf das Ergebnis hat. Dabei wirken sich sowohl die Wahl des Aufstellorts als auch die Emissionen der Anlage deutlich auf die Höhe des Potenzials aus. Es ist zu erwarten, dass mit fortschreitender Technologieentwicklung hin zu Luftwärmepumpen mit geringeren Schallemissionen das Potenzial perspektivisch zunimmt. Zudem kann die Reduktion des Wärmeenergiebedarfs der Gebäude z. B. durch Dämmung der Gebäudehülle das Potenzial weiter erhöhen.

## 7 Erdwärme-Modell

Als Erdwärme wird thermische Energie bezeichnet, die in einem bis wenigen hundert Metern Tiefe unter der Erdoberfläche gespeichert ist. Diese Energie kann als Wärmequelle für Sole-Wasser-Wärmepumpen dienen, die im Weiteren Erdwärmepumpen genannt werden. Zur Wärmeversorgung von Wohngebäuden ist ausreichend Grundstücksfläche für die Erschließung dieser Wärmequelle nötig. Neben der Grundstücksfläche und deren Nutzbarkeit wird das Wärmequellenangebot durch einzuhaltende Abstände, die Verhältnisse im Untergrund und Wasserschutzgebiete eingeschränkt.

In Kapitel 7.1 sind Grundlagen zur Erschließung von Erdwärme beschrieben. Kapitel 7.2 erläutert die entwickelte Methodik zur Quantifizierung des Angebots von durch Wärmepumpen nutzbarer Erdwärme je Grundstück in Deutschland. Das resultierende Potenzial dieser Wärmequelle ist in Kapitel 7.3 beschrieben. Abschließend ist in Kapitel 7.4 ein Zwischenfazit formuliert.

### 7.1 Grundlagen

Als Basis für die Beschreibung der Methodik in Kapitel 7.2 sind nachfolgend Varianten zur Erschließung von Erdwärme beschrieben, wobei Sonderformen wie Wärmepfähle nicht aufgeführt sind (vgl. Tabelle 6-1).

Tabelle 7-1: Varianten zur Erschließung von Erdwärme mit Wärmepumpen

Variante		Beschreibung
Erdsonde		Für Erdsonden werden Bohrungen in bis zu 400 m Tiefe realisiert. In diese Bohrung wird der Wärmetauscher in Form von langen Kunststoffrohren installiert. Aufgrund der Tiefe ist die Temperatur über das Jahr annähernd konstant (vgl. [70]).
Erdkollektor	Horizontalkollektor	Für Horizontalkollektoren werden Kunststoffrohre i. d. R. in 1,0 bis 1,5 m Tiefe in das Erdreich flächig eingebracht (vgl. [137]).
	Kapillarrohrmatte	Kapillarrohrmatten weisen einen kleineren Rohrdurchmesser und -abstand als Horizontalkollektoren auf und erreichen somit höhere spezifische Entzugsleistungen (vgl. [138]).
	Erdwärmekorb	Erdwärmekörbe sind zylindrische oder kegelmantelförmige Drahtkörbe, welche mit Kollektorrohren umwickelt sind. Sie werden in einer Tiefe von 1 bis 3,5 m vergraben (vgl. [138]).
	Spiralkollektor	Spiralkollektoren sind zylindrisch und länglich geformt und werden vertikal mehrere Meter tief eingebaut (vgl. [137]).
	Grabenkollektor	Die Kollektorrohre werden in einem bis zu 5 m tiefen Graben entweder an der Wand befestigt (vgl. [137]) oder in Form von Schlingen (vgl. Künnettenkollektor in [68]) waagrecht auf die Grabensohle gelegt bzw. senkrecht in den Graben gestellt.

Welche Varianten im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigt werden ist in Kapitel 7.2.1 beschrieben.

## 7.2 Methodik

Im Folgenden ist die Methodik zur Quantifizierung des Angebots von Erdwärme beschrieben.

Im Rahmen dieser Arbeit werden sowohl Erdsonden als auch Erdkollektoren auf ihr Potenzial zur Wärmeversorgung von Wohngebäuden hin untersucht (vgl. Kapitel 7.2.1). Abbildung 7-1 zeigt den Überblick über die Methodik dieses Erdwärme-Modells anhand der abgebildeten Parameter und deren Zusammenhängen.

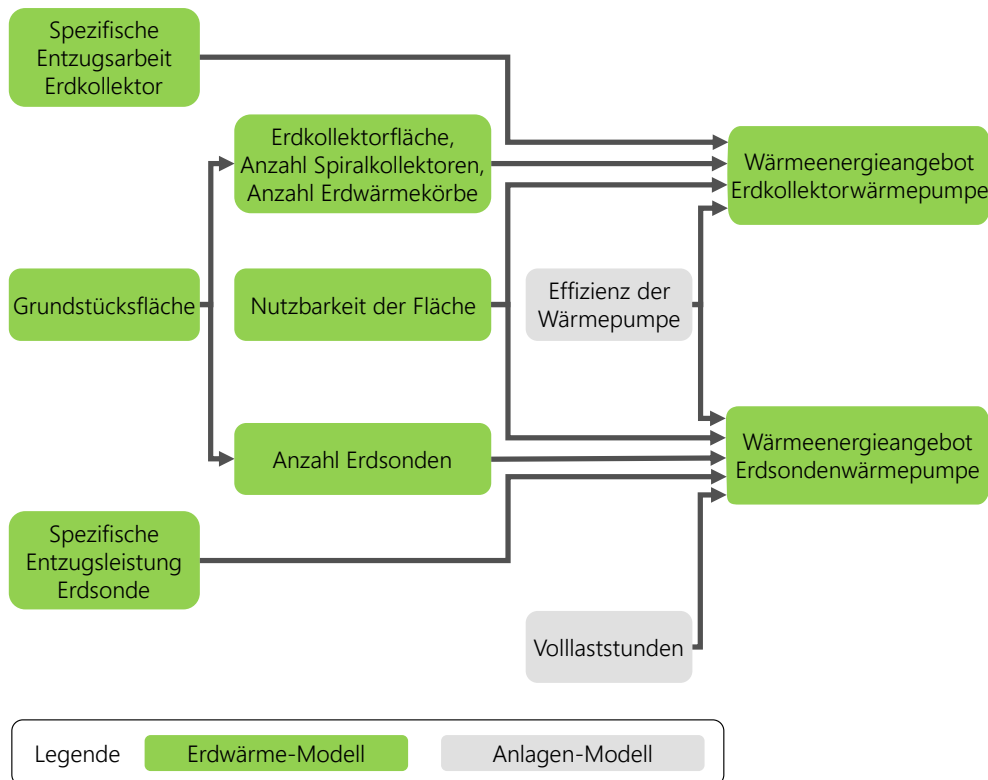


Abbildung 7-1: Überblick Methodik Erdwärme-Modell

Zu Beginn wird für jedes der 17,1 Mio. Wohngebäude zur Approximation der Grundstücksfläche eine Grundstücksgeometrie ermittelt (siehe Kapitel 7.2.2). Darauf aufbauend werden durch geometrische Funktionen Mindestabstände zu Nachbargrundstücken berücksichtigt. Auf diese Weise kann die maximale Erdkollektorfläche (siehe Kapitel 7.2.3) ausgewiesen werden. Zudem wird anhand eines Algorithmus unter Einhaltung definierter Abstände die maximale Anzahl an Erdsonden, Erdwärmekörpern und Spiralkollektoren je Grundstück bestimmt. Danach folgt eine Auswertung der Nutzbarkeit der Grundstücksfläche anhand statistischer Methoden, da diese aufgrund von Nutzungskonkurrenz (z. B. durch bestehende Bäume) meist nur zum Teil für Erdwärme nutzbar ist (vgl. Kapitel 7.2.5). Zudem wird die Entzugsarbeit bzw. -leistung je Quadratmeter Kollektor bzw. je Sonde modelliert (vgl. Kapitel 7.2.6). Als weitere Restriktion für die Nutzung von Erdwärme werden Wasserschutzgebiete sowie Gebiete mit Vorkommen von Gips- oder Anhydrit anhand von Geodaten mit einbezogen. Anhand der genannten Parameter lässt sich das Wärmequellenangebot berechnen. Mit der Effizienz der Wärmepumpe bzw. den angesetzten Volllaststunden (vgl. Kapitel 5) lässt sich das Wärmeenergieangebot für Erdwärmepumpen quantifizieren. Im Ergebnis ist ein Gebäude laut dem Modell für den Einsatz einer Erdwärmepumpe geeignet, wenn das Wärmeenergieangebot mindestens dem Wärmeenergiebedarf (vgl. Kapitel 4) entspricht.

## 7.2.1 Untersuchungsrahmen

Dieses Kapitel beschreibt welche Varianten zur Erschließung von Erdwärme analysiert werden und welche Einflussfaktoren für die Bewertung der Erdwärmennutzung im Modell berücksichtigt werden.

Erdsonden weisen i. d. R. den geringsten Flächenbedarf auf und sind deshalb für Bestandsgebäude bzw. die Installation auf Grundstücken mit konkurrierenden Nutzungen besonders geeignet (vgl. [68]). Aufgrund lokaler Limitierungen wie einer begrenzten Bohrtiefe (vgl. Kapitel 7.2.6.2) können Erdkollektoren eine Alternative zu Erdsonden darstellen und werden deshalb ebenfalls analysiert. Mit Ausnahme des Grabenkollektors, bei dem die Grabenform und -länge von individuellen Gegebenheiten abhängt, werden alle in Tabelle 7-1 aufgeführten Varianten anhand geometrischer Analysen je Gebäude abgebildet.

Im Modell sollen die Restriktionen der Erdwärmennutzung abgebildet werden, die einen signifikanten Einfluss auf die Höhe des Potenzials aufweisen. Zu diesem Zweck werden die Einflussfaktoren zunächst bezüglich ihrer Relevanz, Generalisierbarkeit und Datenverfügbarkeit qualitativ bewertet (vgl. Tabelle 7-2). Generalisierbar bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Einfluss des Effekts im Modell einheitlich abgebildet werden kann, sodass er anhand von automatisierten Algorithmen quantifizierbar ist. Die Kategorie Datenverfügbarkeit bezieht sich auf das Vorhandensein frei zugänglicher Informationen je Gebäude für das gesamte Bundesgebiet.

Tabelle 7-2: Untersuchungsrahmen Erdwärme-Modell, eigene Auflistung auf Basis von [15], [68], [70], [139] und [140])

Einflussfaktor	Relevanz	Generalisierbarkeit	Datenverfügbarkeit	Modelliert mit
Vorhandene Grundstücksfläche	✓	✓	o	Geodaten
Abstände zu Gebäuden und Grundstücken	✓	✓	o	Geodaten
Anzahl Bohrungen	✓	o	o	Geodaten
Nutzbarkeit der Grundstücksfläche	✓	o	o	Statistik
Entzugsarbeit Erdkollektor (Bodenart, Klimazone)	✓	✓	✓	Geodaten
Bohrtiefe Erdsonde	✓	o	x	Statistik
Entzugsarbeit Erdsonde	✓	o	x	Annahme
Ausschlussgebiete (Wasserschutz, Gips- bzw. Anhydrit-Schicht)	✓	✓	✓	Geodaten
Zufahrtmöglichkeit und Platzbedarf zur Einrichtung der Baustelle	o	o	o	x
Grabbarkeit und Hangneigung (Ausschlusskriterien Erdkollektor)	o	✓	x	x
Weitere Bohrrisiken z. B. durch geologische Störungen (Ausschlusskriterien Erdsonde)	x	o	x	x

✓ = zutreffend; o = eingeschränkt zutreffend; x = nicht zutreffend

Die Modellierung der betrachteten Einflussfaktoren – in Tabelle 7-2 grün hervorgehoben – ist in den folgenden Kapiteln beschrieben.



## 7.2.2 Grundstücksfläche

Ausgangspunkt für die Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von Erdwärme ist die Bestimmung der verfügbaren Grundstücksfläche. Diese Daten sind für einzelne Bundesländer allerdings nicht flächendeckend frei verfügbar. Aus diesem Grund wird für die Modellierung der Grundstücksfläche eine alternative Vorgehensweise gewählt. In diesem Kapitel ist beschrieben, wie anhand von Gebäudegrundrissen und Daten zur Flächennutzung die Grundstücksfläche je Gebäude ermittelt wird. Fokus dieser Methodik ist es die Fläche zu approximieren und nicht die exakte Form bzw. Lage des Grundstücks zu ermitteln. Um alle Gebäude einheitlich zu bewerten, wird dieses Vorgehen auf das gesamte Bundesgebiet angewendet.

Für diesen Zweck wird das Voronoi-Diagramm genutzt. Voronoi-Diagramme unterteilen einen Raum in Regionen. Im Zentrum jeder Region steht ein Punkt, wobei die Grenze zwischen den Regionen jeweils gleichweit von den umgebenden Punkten entfernt ist. Unter der Annahme, dass die Lage von bzw. der Abstand zwischen Gebäuden in Zusammenhang mit deren Grundstücksgröße steht, können Grundstücke als Voronoi-Regionen approximiert werden. Eine weitere Prämisse ist: Jedes Gebäude befindet sich auf einem separaten Grundstück. Diese Annahme ist zudem konform mit der Zielsetzung der Arbeit die Möglichkeiten je Einzelgebäude zu quantifizieren.

Zur Laufzeitoptimierung des Erdwärme-Modells werden die folgenden Schritte parallelisiert je Postleitzahl-Region ausgeführt:

### 1. Berücksichtigte Gebäude definieren

- Zu Beginn wird definiert, welche Gebäude für die Modellierung von Grundstücken relevant sind.
- Neben Gebäuden, welche innerhalb der Postleitzahl-Geometrie liegen, werden zur Modellierung der Randbereiche nahegelegene Gebäude in einem Umkreis von 50 m um die Postleitzahl-Region erfasst.
- Nebengebäude wie Garagen, Carports, Gewächshäuser, Schuppen o. ä. werden von den folgenden Schritten ausgeschlossen, da sich diese i. d. R. nicht auf separaten Grundstücken befinden. Die Identifikation von Nebengebäuden ist in Kapitel 4.2.1.1 erläutert.

### 2. Voronoi-Regionen berechnen

- Um die Form jedes Gebäudes zu berücksichtigen, werden statt des Gebäudemittelpunkts mehrere Punkte auf dem Gebäudeumriss für die Erstellung der Voronoi-Region verwendet. Dabei werden zu den Punkten des Polygons durch Interpolation 40 weitere Punkte in regelmäßigem Abstand auf dem Umriss des Gebäudes verteilt. Die Anzahl der Punkte stellt dabei einen zielführenden Kompromiss aus resultierender Grundstücksform und Rechendauer dar.
- Berechnung der Voronoi-Regionen auf Basis der Punktdaten anhand der entsprechenden PostGIS-Funktion
- Vereinigung der Voronoi-Regionen, die zu einem Gebäude gehören zu einem Polygon

### 3. Randbereiche beschneiden

Um keine Fläche doppelt zu berücksichtigen, werden die entstandenen Polygone auf die Geometrie der Postleitzahl-Region beschnitten.

#### 4. Flächen mit anderweitiger Nutzung abziehen

- Im Anschluss werden die entstandenen Grundstücke um Flächen mit der Nutzung Gewerbe, Landwirtschaft, Industrie o. ä. beschnitten. Die Gewerbeflächen o. ä. sind entsprechend der Zielsetzung, nur Wohngebäude zu analysieren (vgl. Kapitel 3.2), nicht weiter von Belang. Die Daten zur Landnutzung werden [84] und [83] entnommen.
- Um Straßen von angrenzenden Grundstücken zu differenzieren, werden Daten aus [37] genutzt. Hier sind Straßen mit dem Attribut „highway“ als Linien hinterlegt. Anhand von Recherche und Annahmen wurde eine Breite je Straßenkategorie definiert (siehe Tabelle 14-2 im Anhang). Durch einen entsprechenden Puffer um die Linie kann die Grundstücksfläche begrenzt werden.

Das Resultat sind die in Abbildung 7-2 exemplarisch dargestellten Grundstücksgeometrien.



Gebäude: © OpenStreetMap Mitwirkende

Abbildung 7-2: Approximation von Grundstücken, Darstellung auf Basis von [37]

Zur Validierung der so ermittelten Grundstücksfläche wird eine Stichprobe von 2.761 Grundstücken amtlichen Daten [141] gegenübergestellt. Hierzu werden die Flächen der Grundstücke im Modell und in der Referenz anhand eines Geoinformationssystems manuell vermessen. Das Ergebnis dieser Validierung ist in Kapitel 7.3.1 erläutert.

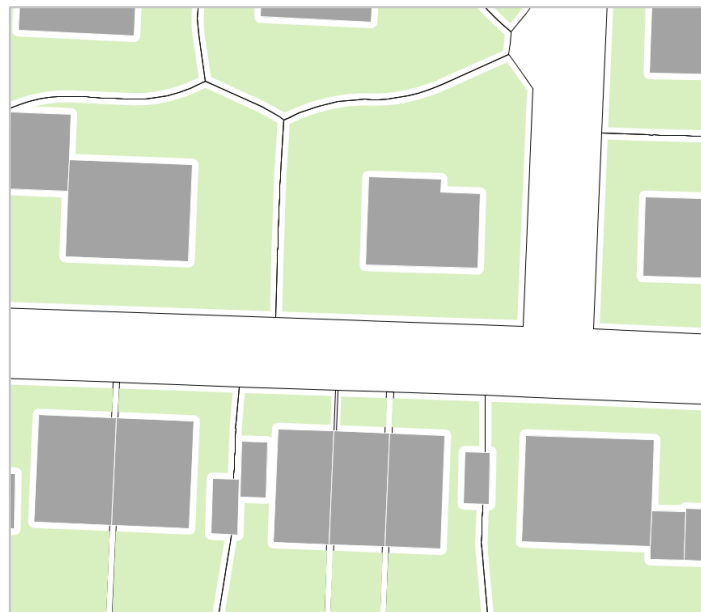
#### 7.2.3 Erdkollektorfläche

In diesem Kapitel bezieht sich der Begriff Erdkollektor auf Horizontalkollektoren und Kapillarrohrmatten. Die Ermittlung der maximalen Erdkollektorfläche erfolgt auf Basis der Grundstücksgeometrie (siehe Kapitel 7.2.2). Hierbei werden vorgegebene Abstände zu Nachbargrundstücken und zum analysierten Gebäude sowie das Gebäude selbst beachtet.

Erdkollektoren müssen zu Gebäuden, Fundamenten o. Ä. einen Mindestabstand von 1 m einhalten. Zur Grundstücksgrenze ist ebenfalls ein Abstand von 1 m einzuhalten. [137]

Im Erdwärme-Modell werden diese Anforderungen umgesetzt, indem das Gebäudepolygon inklusive eines positiven Puffers von 1 m vom Grundstück abgezogen wird. Um den vorgegebenen Abstand zu Nachbargrundstücken zu wahren, wird von dem entstandenen Polygon ein negativer Puffer

von 1 m abgezogen. Abbildung 7-3 zeigt das Ergebnis, wobei die für Erdkollektoren nutzbare Fläche grün gefärbt ist.



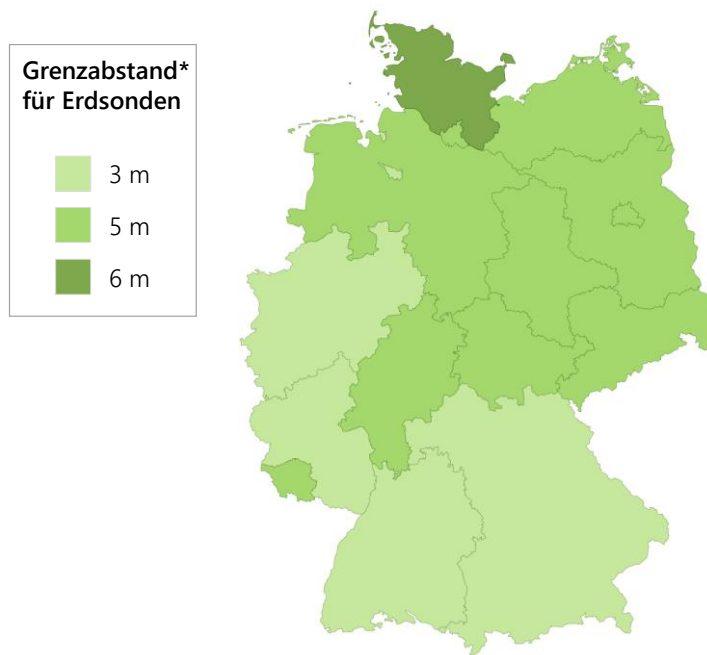
Gebäude und Straßen: © OpenStreetMap Mitwirkende

Abbildung 7-3: Maximale Grundstücksfläche Erdkollektor, Darstellung auf Basis von [37]

#### 7.2.4 Anzahl Erdsonden

Um das Wärmequellenangebot von Erdsonden zu quantifizieren, wird in diesem Kapitel die Methodik zur Ermittlung der maximalen Anzahl realisierbarer Erdsonden beschrieben. Diese Vorgehensweise wird ebenfalls für Erdwärmekörbe und Spiralkollektoren angewendet.

Neben den in Kapitel 7.2.2 ermittelten Grundstücksgeometrien werden die einzuhaltenden Abstände zu Nachbargrundstücken, zum analysierten Gebäude sowie zwischen den Erdsonden berücksichtigt. Um die Standsicherheit von Gebäuden nicht zu gefährden, wird nach [137] ein Mindestabstand von 2 m zwischen Bohrungen und bestehenden Gebäuden empfohlen. Nach [137] wird zu Nachbargrundstücken ein Abstand von 5 m empfohlen, ein Teil der Bundesländer in Deutschland gibt hiervon abweichende Regelungen vor. Die in Abbildung 7-4 dargestellten Werte geben einen Überblick zu den Vorgaben bzw. Empfehlungen zum Abstand von Bohrloch zu Grundstücksgrenze je Bundesland, wobei die Werte einzelner Bundesländer für Bohrtiefen unter 50 m oder über 100 m abweichen können. Im Einzelfall können geringere Abstände mit Nachbarn vereinbart werden.



\* kann je nach Bohrtiefe abweichen

Administrative Grenzen: © GeoBasis-DE / BKG-2017 | Generalisierung FfE

Abbildung 7-4: Vorgabe bzw. Empfehlung zum Abstand von Bohrloch zu Grundstücksgrenze, eigene Darstellung auf Basis von [137], [140], [142], [143], [144], [145] und [146]

Die Abstände von Erdsonden zu Grundstücksgrenzen (vgl. Abbildung 7-4) und zu Gebäuden werden analog zur Vorgehensweise in Kapitel 7.2.3 durch Pufferung und Verschneidung der entsprechenden Geometrien realisiert.

### Maximale Anzahl an Erdsonden

Nach Abzug der Abstandsflächen wird die Anzahl der maximal möglichen Erdsonden ermittelt. Für Kleinanlagen bis 30 kW Heizleistung gibt [137] den Minimalabstand zwischen Bohrlöchern mit 6 m an, wobei für die Verwendung der Entzugsarbeit bzw. -leistung weitere Bedingungen wie eine möglichst linienförmige Anordnung und eine maximale Anzahl an Erdsonden von 5 angegeben ist. Dieser Minimalabstand zwischen den Erdsonden dient als Eingangsgröße im Modell. Die weiteren Bedingungen werden zur Reduktion der Komplexität hingegen nicht explizit abgebildet. Die gegenseitige thermische Beeinflussung bei einer größeren Anzahl von Erdsonden wird in der Modellierung der Entzugsleistung berücksichtigt (vgl. Kapitel 7.2.6.2). Eine Begrenzung der maximalen Anzahl an Bohrungen je Grundstück erfolgt nicht, da dies keine technische Limitierung darstellt.

Die Grundlage für dieses Modell ist ein Algorithmus, welcher zur Ermittlung optimaler Standorte von Windkraftanlagen in einem Windeignungsgebiet entwickelt wurde [147]. Übertragen auf den vorliegenden Anwendungsfall bedeutet das, dass ein Raster von Punkten mit 6 m Abstand auf die Grundstücksfläche gelegt und in x und y Richtung so verschoben wird, sodass möglichst viele Punkte auf der Fläche zum Liegen kommen (siehe Abbildung 7-5). Weiter wären auch die Drehung sowie die versetzte Anordnung der Punkte denkbar, wodurch die Rechenzeit jedoch deutlich ansteigen würde.



Gebäude und Straßen: © OpenStreetMap Mitwirkende

Abbildung 7-5: Ermittlung der maximalen Anzahl von Erdsonden, Darstellung auf Basis von [37]

Da die Punkte selbst dimensionslos sind, wird von der Fläche vorab noch der Radius des Bohrlochs abgezogen. Dies erfolgt anhand eines negativen Puffers. Nach [140] wird für den Durchmesser des Bohrlochs 0,17 m angesetzt.

### Maximale Anzahl am Erdwärmekörpern und Spiralkollektoren

Analog zur beschriebenen Methodik für Erdsonden erfolgt auch die Ermittlung der maximalen Anzahl von Kollektorkörpern und Spiralkollektoren.

Dimensionen und Abstände für Erdkollektoren werden wie die Entzugsarbeit (siehe Kapitel 7.2.6.1) der Richtlinie VDI 4640 entnommen. Demnach beträgt der Durchmesser von Spiralkollektoren 0,5 m und der von Erdwärmekörpern maximal 1,7 m. Die dazugehörigen Mittelpunktabstände betragen jeweils 4 m. Zum Gebäude werden 2 m und zum Nachbargrundstück 1 m Abstand eingehalten. [137]

## 7.2.5 Nutzbarkeit der Grundstücksfläche

In den Kapiteln 7.2.2 bis 7.2.4 wurde die Grundstücksfläche, die maximale Fläche für Erdkollektoren und die maximale Anzahl an Erdsonden bestimmt. Aufgrund konkurrierender Nutzungen kann Erdwärme meist nicht auf der gesamten Grundstücksfläche erschlossen werden. Vor diesem Hintergrund wird angenommen, dass konkurrierende Nutzungen wie existierende Bäume, Pools, Terrassen o. ä. weiter bestehen bleiben. Deshalb wird in diesem Kapitel der nutzbare Anteil der Grundstücksfläche je Gebäudetyp und Siedlungsraum unter Berücksichtigung konkurrierender Nutzungen statistisch ausgewertet. Die Nutzungskonkurrenz im Untergrund wie z. B. durch bestehende Tiefgaragen o.ä. wird nicht analysiert.

Die hierzu verwendete Stichprobe besteht aus Grundstücken, die in der Validierung der Grundstücksfläche (vgl. Kapitel 7.3.1) eine hohe Genauigkeit bzgl. Fläche und Lage aufgewiesen haben. Anhand von Satellitendaten [141] wird manuell der Anteil der Grundstücksfläche erfasst, welcher potenziell für die Nutzung von Erdwärme zur Verfügung steht und somit weder Baum, Terrasse, Garage oder Pool enthält. Insgesamt wurden auf diese Weise 553 Grundstücke ausgewertet. Abbildung 7-6 zeigt die Häufigkeit des Anteils, der für Erdwärme nutzbaren Grundstücksfläche differenziert nach

Siedlungsraum (Definition in Kapitel 4.2.1.2). Der nutzbare Anteil ist dabei in 10 %-Schritten in Intervalle unterteilt, wobei jeweils der Mittelwert des Intervalls auf der Abszisse angegeben ist. Die Gebäudegrundfläche wird vor dieser Analyse von der Grundstücksfläche abgezogen und fließt damit nicht in den dargestellten Anteil mit ein.

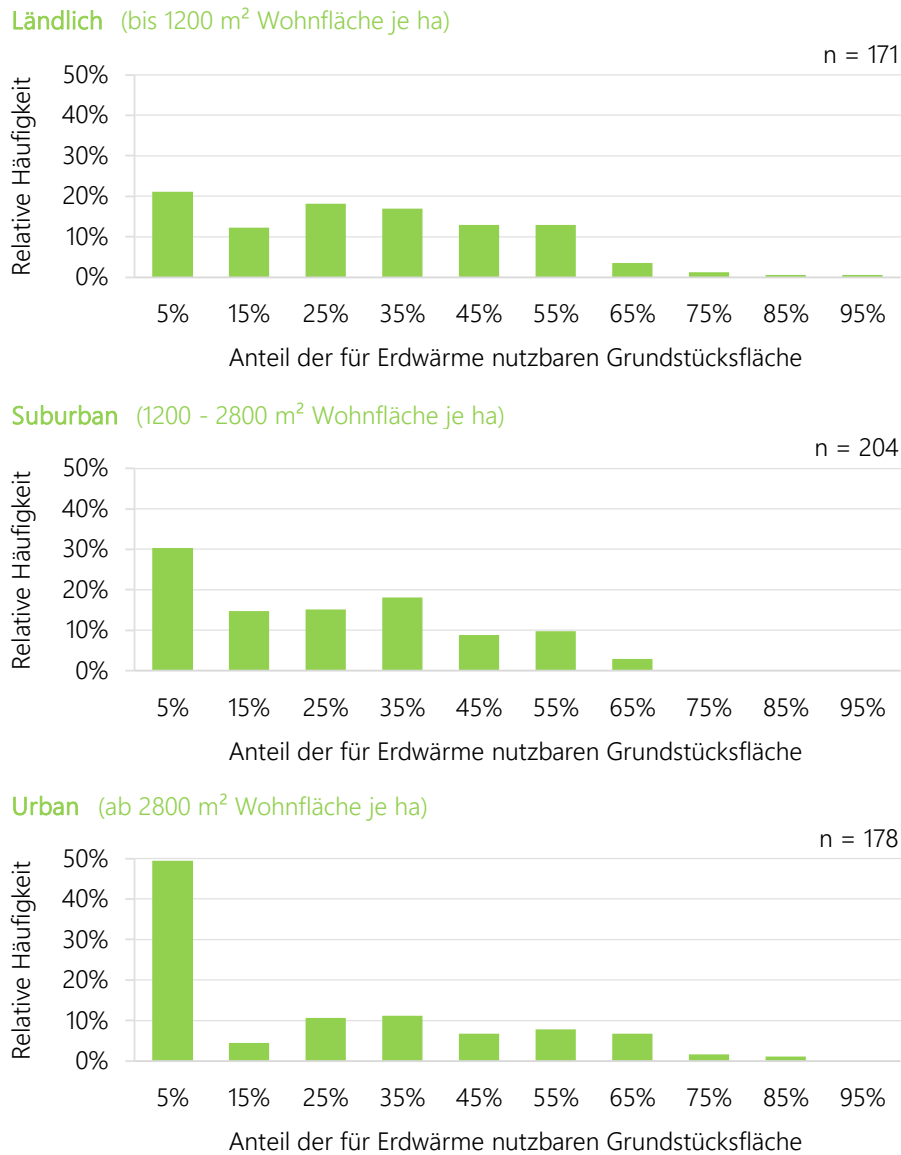


Abbildung 7-6: Nutzbarkeit der Grundstücksfläche für Erdwärme je Siedlungsraum

Abbildung 7-6 zeigt, dass der Anteil der Grundstücksfläche, der für Erdwärme nutzbar ist im ländlichen Raum höher und in urbanen Gebieten geringer ist. Über die Siedlungsräume hinweg tritt der Wert 5 % (repräsentativ für Werte im Intervall von 0-10 %) am häufigsten auf, wobei die im Fall der Klasse „Urban“ bereits auf 49 % der Grundstücke zutrifft. Werte über 70 % kommen nur sehr selten vor.

Um die Nutzbarkeit der Grundstücksfläche im Modell zu berücksichtigen, wird der in Abbildung 7-6 dargestellte Anteil mit der maximalen Anzahl an Sonden, Körben, Spiralen bzw. der Fläche für Erdkollektoren multipliziert und das Ergebnis auf Ganzzahlen abgerundet. Die Zuweisung des Anteils auf die Grundstücke bzw. Gebäude erfolgt je Postleitzahl zufällig, wobei der Siedlungsraum und die Wahrscheinlichkeit (relative Häufigkeit aus Abbildung 7-6) berücksichtigt werden. Eine Begrenzung der maximalen Anzahl an Erdsonden erfolgt nicht, da dies keine technische Limitierung darstellt.

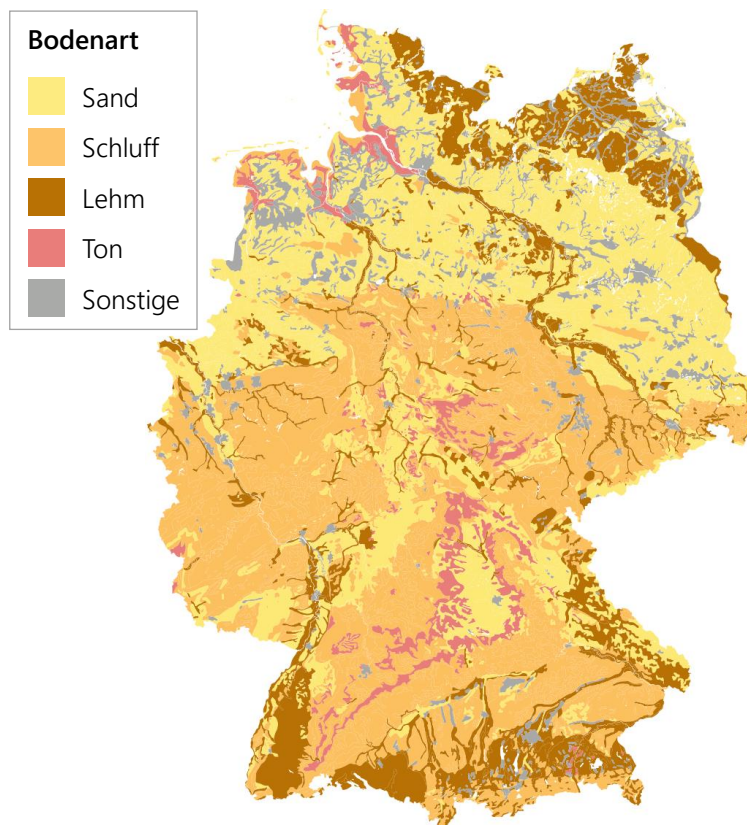
## 7.2.6 Wärmeenergieangebot

Für die Quantifizierung des Angebots von Erdwärme wird neben der Fläche bzw. der Anzahl an Erdkollektoren und -sonden die Entzugsarbeit je Quadratmeter Erdkollektor bzw. je Erdsonde, Spiralkollektor und Erdwärmekorb benötigt. Die Modellierung dieser Parameter ist im Folgenden dargelegt.

### 7.2.6.1 Erdkollektor

Auf Grundlage der Daten von [137] kann die Entzugsarbeit von Erdkollektoren in Abhängigkeit der Bodenart und der Klimazone den Regionen und damit den Gebäuden zugewiesen werden.

**Bodenart:** Mittels frei verfügbarer Daten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe kann die Bodenart flächendeckend abgebildet werden. Hierzu wurden 9 der 14 Klassen aus [148] zu den vier Hauptbodenarten Ton, Lehm, Schluff und Sand aggregiert, für die in [137] Entzugsarbeiten hinterlegt sind (vgl. Abbildung 7-7).



Datenquelle: BOART1000OB V2.0, © BGR, Hannover, 2007 | Aggregation in Klassen: FfE

Abbildung 7-7: Hauptbodenarten in Deutschland, eigene Darstellung aus Daten von [148]

Klassen, die in Abbildung 7-7 unter „Sonstige“ subsummiert sind zählen nicht zu den Hauptbodenarten, sind demnach nicht in [137] aufgeführt und werden wie folgt behandelt: Klassen wie „Moor“, die auf einen hohen Feuchtigkeitsgehalt hindeuten wird die maximale Entzugsarbeit der jeweiligen Klimazone zugewiesen. Der unspezifischen Klasse „Abbaufäche“ wird als Ersatzwert der Mittelwert der Entzugsarbeiten je Klimazone zugeordnet. Die Klasse „Siedlung“ wird aufgrund ihres häufigeren Vorkommens differenziert betrachtet. Konkret wird die – nach der Fläche beurteilt – am häufigsten vorkommende Bodenart der Gemeinde – ausgenommen der Klasse „Siedlung“ – bestimmt. Diese Bodenart wird für Flächen der jeweiligen Gemeinde angenommen, welche als „Siedlung“ ausgewiesen sind. Durch räumliche Verschneidung kann die Bodenart den Grundstücken zugeordnet

werden. Im Ergebnis werden den 17,1 Mio. als Wohngebäude identifizierten Gebäuden bzw. deren Grundstücken folgende Bodenarten zugeordnet: 44 % Schluff, 34% Sand, 18% Lehm und 4% Ton.

**Klimazone:** Für die Entzugsarbeit nach VDI 4640 ist neben der Bodenart die Klimazone relevant, welche anhand von DIN 4710 (vgl. [149]) abgebildet wird. Durch räumliche Verschneidung wird jedem Gebäude die entsprechende Klimazone zugewiesen.

Anhand von Bodenart und Klimazone kann jedem Grundstück nach [137] die Entzugsarbeit je Kollektorart zugewiesen werden. Für Gebäude, denen keine Bodenart zugeordnet werden konnte, wird als Ersatzwert die ungewichtete mittlere Entzugsarbeit je Klimazone verwendet. Dies trifft auf rund 0,16 % der analysierten Wohngebäude zu, welche sich überwiegend nahe der deutschen Grenze befinden.

#### 7.2.6.2 Erdsonde

---

Für Erdsonden ist die spezifische Entzugsarbeit je Bohrmeter und die Bohrtiefe relevant.

##### **Spezifische Entzugsarbeit**

[137] umfasst Werte für die spezifische Entzugsarbeit von Erdsonden, die nach der Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds differenziert sind. Daten zur Wärmeleitfähigkeit sind nicht flächendeckend frei verfügbar. Aus diesem Grund wurde für Erdsonden stattdessen ein Ansatz gewählt, der sich an der gängigen Praxis orientiert: Für Kleinanlagen mit einer Heizleistung bis 30 kW wird pauschal eine Entzugsleistung von 50 W pro Bohrmeter angenommen. Für Anlagen mit Heizleistungen über 30 kW ist nach [137] eine detaillierte Auslegung notwendig. Zur Ermittlung der lokalen Untergrundverhältnisse wird der sogenannte Thermal-Response-Test durchgeführt. Eine Befragung von Experten ergab eine hieraus im Mittel resultierende Entzugsleistung von 35 W pro Bohrmeter. Dieser konservative Ansatz ist mit dem im Erdwärme-Modell gewählten, einheitlichen Sondenabstand konform (vgl. Kapitel 7.2.4). Um die Entzugsarbeit zu berechnen, wird die Entzugsleistung mit den Volllaststunden (vgl. Kapitel 5.2.2) multipliziert.

##### **Bohrtiefe**

Die mögliche Bohrtiefe hängt von vielen Faktoren – wie den Grundwasserverhältnissen, quellenden Gesteinszonen u.v.m. (vgl. [18]) – ab, wobei die rechtlichen Regelungen hierzu je Bundesland variieren. Frei verfügbare Geodaten zu diesen Einflussfaktoren liegen nicht flächendeckend vor. Vielfach wird in Forschungsprojekten deshalb pauschal 100 m als Bohrtiefe angesetzt (vgl. [17] und [15]). Diese Annahme basiert auf der Tiefenbegrenzung, die ohne Genehmigung nach dem Bundesberggesetz (vgl. [150]) nicht überschritten werden darf. Dies stellt jedoch keine technische Limitierung dar und wird zudem in der Praxis mit Genehmigung vielfach überschritten (vgl. [18]). Um die Heterogenität bzgl. der möglichen Bohrtiefe abzubilden, wird statt einer pauschalen Annahme eine statistische Verteilung im Erdwärme-Modell berücksichtigt. Hierzu wurde eine statistische Auswertung der Bohrtiefe eines auf die Bohrung von Erdsonden spezialisierten Unternehmens herangezogen [151]. Abbildung 7-8 zeigt diese Werte, welche unter Annahme eines Minimal- und Maximalwerts sowie der Gleichverteilung je Kategorie, auf Intervalle von 10 m disaggregiert wurden.



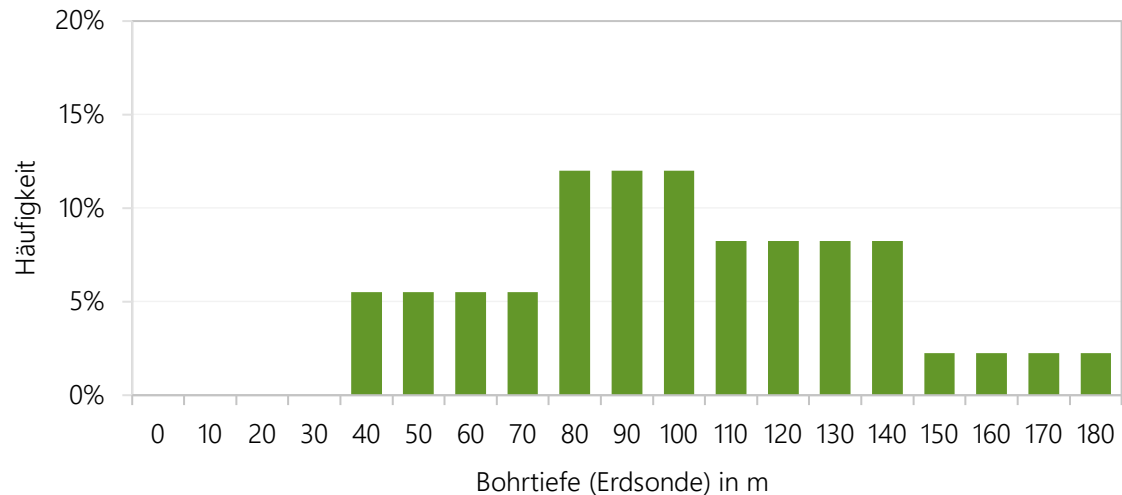


Abbildung 7-8: Verteilung der Bohrtiefe in Deutschland (außerhalb von Bayern), eigene Darstellung auf Basis von Annahmen und Daten nach [151]

Die mittlere Bohrtiefe der in Abbildung 7-8 dargestellten Verteilung ergibt rund 100 m. Dies deckt sich mit einer in [18] durchgeführten Befragung von 21 über Deutschland verteilten Bohrunternehmen.

Da v. a. in Bayern bzgl. der möglichen Bohrtiefe restriktivere Regelungen gelten (vgl. [18]), wird für dieses Bundesland eine abweichende Verteilung der Bohrtiefe angenommen. Dabei wird ausgehend von der in Abbildung 7-8 dargestellten Verteilung der tatsächlich umgesetzten Bohrtiefen folgendermaßen vorgegangen: Aufgrund der hohen Auflagen wird der Minimalwert in Anlehnung an [18] auf 30 m herabgesetzt. Auf Basis einer Experteneinschätzung beträgt die mittlere Bohrtiefe rund 75 m. Um dies abzubilden, werden die Anteile der Bohrtiefen unter 70 m höher gewichtet. Darüber hinaus werden rund 15 % der Wohngebäude mit dem Wert 0 m belegt, um die in [26] als ungeeignet eingestuft Gebiete zu berücksichtigen. Abbildung 7-9 zeigt die resultierende Verteilung der Bohrtiefen für Bayern.

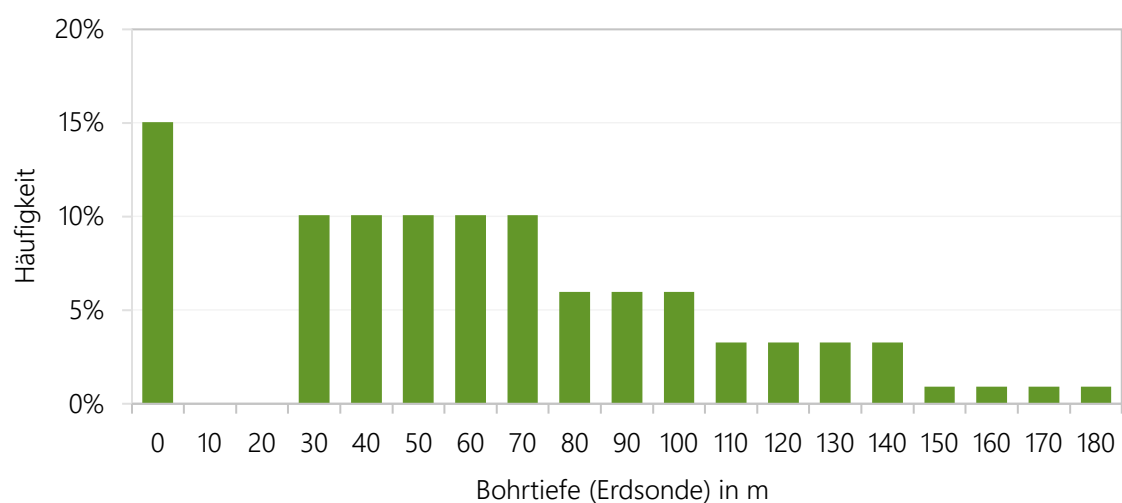


Abbildung 7-9: Verteilung der Bohrtiefe in Bayern, eigene Darstellung auf Basis von Annahmen und Daten nach [151]

### 7.2.7 Ausschlussgebiete

In bestimmten Gebieten ist die Erschließung bzw. der Betrieb von Anlagen zur Erdwärmenutzung ausgeschlossen bzw. nur in Einzelfällen möglich. Gebiete, die dem Wasserschutz unterliegen oder in denen Vorkommen von Gips- oder Anhydrid bekannt sind, sind nicht für die Erschließung von Erdsonden geeignet. Im Folgenden ist beschrieben, wie diese Ausschlussgebiete im Modell abgebildet werden.

#### Wasserschutzgebiete

Zur Einbringung bzw. Nutzung von Erdsonden ist das Wasserhaushaltsgesetz (vgl. [152]) zu beachten. Da die Wasserschutzzonen I und II unmittelbar im Bereich von Anlagen zur Trinkwassergewinnung liegen, ist dort der Einsatz von Erdsonden landesweit verboten. Für die Zonen III bis IIIc ist eine Genehmigung in Einzelfällen möglich, wobei dies u. a. Einschränkungen bzgl. des Einsatzes wassergefährdender Stoffe (Wärmeträgermedium) und der möglichen Bohrtiefe haben kann. Für die Zulassung sind die unteren Wasserbehörden zuständig, wobei diesbezüglich keine einheitliche Regelung vorliegt. [15]

Unter Berücksichtigung der Leitfäden der Bundesländer fasst [153] zusammen:

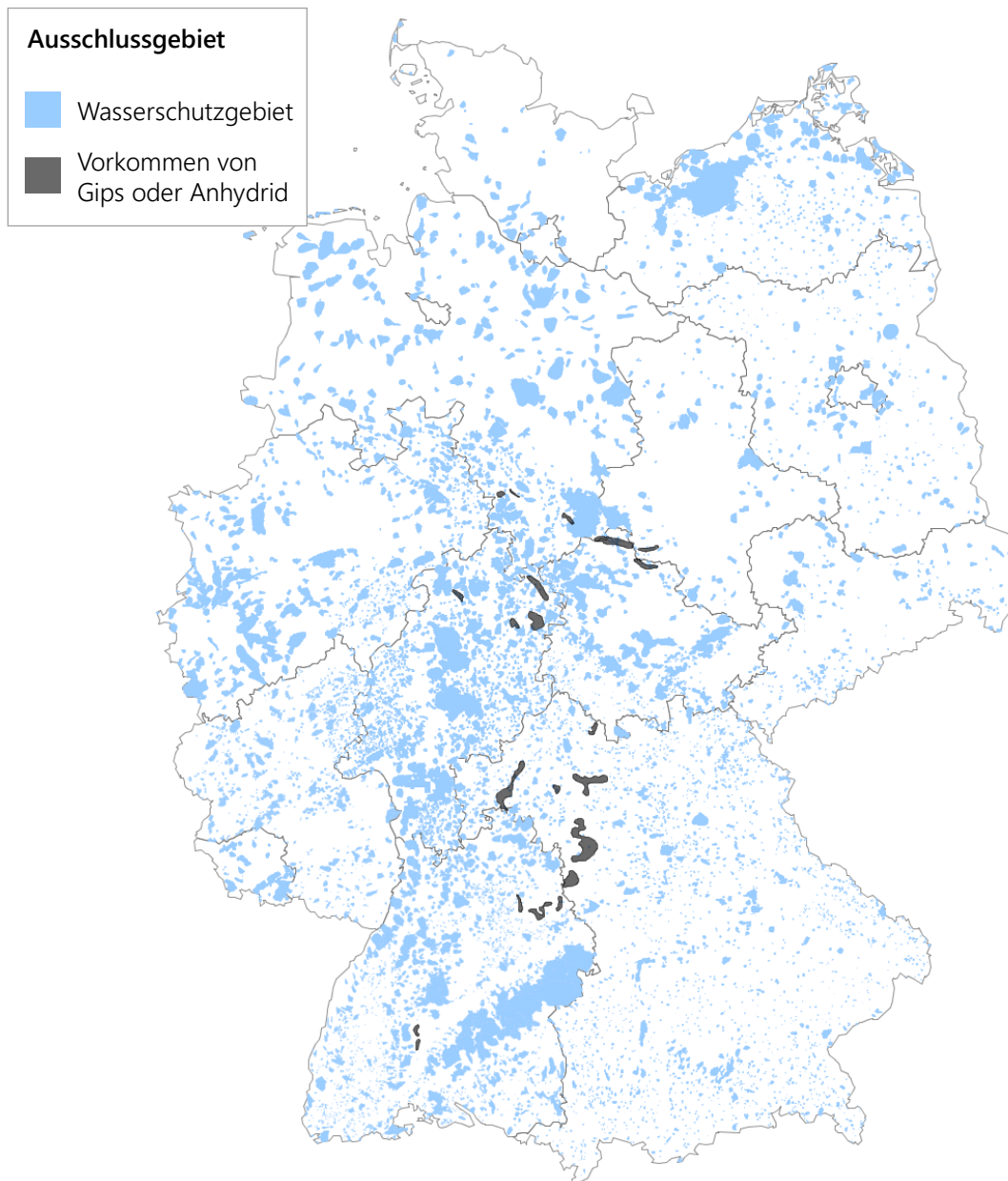
„In der Zone I bis III/IIIa von Wasserschutzgebieten ist der Bau und Betrieb von Erdwärmesonden i. d. R. verboten. Ausnahmen sind in den Zonen III/IIIa im Einzelfall [...] möglich, wenn eine Erdwärmesonde in einem Geringleiter bzw. außerhalb des genutzten Grundwasserleiters eingerichtet werden soll. In Zonen IIIB ist über die wasserrechtliche Erlaubnisbedürftigkeit und -fähigkeit im Einzelfall zu entscheiden. In Zonen IIIB für Karstgrundwasserleiter mit hohen Abstandsgeschwindigkeiten des Grundwassers ist dabei das zusätzliche Gefährdungspotenzial nach Durchbohren bzw. unterhalb einer schützenden Grundwasserüberdeckung besonders zu bewerten. In Quellenschutzgebieten für staatlich anerkannte Heilquellen sind bei der Prüfung auch die quantitativen Schutzzonen und -bestimmungen zu berücksichtigen.“ [153]

In [16] wurden für 31 von 53 Kreisen in Nordrhein-Westfalen Antragsformulare ausgewertet und ein Vorschlag für eine harmonisierte Version entworfen. Dies veranschaulicht, dass bereits innerhalb eines Bundeslandes Differenzen bestehen bzw. die Genehmigung von Erdsonden in der Zone III regional unterschiedlich ist. Aus diesem Grund und wegen des Aufwands zur Einhaltung zusätzlicher Auflagen, werden im Rahmen dieser Arbeit alle Wasser- und Heilquellenschutzgebiete (Zonen I bis III) als Ausschlussgebiete behandelt. Abbildung 7-10 zeigt u. a. die Wasserschutzgebiete in Deutschland. Die räumliche Verschneidung der Gebäude und dieser Gebiete ergibt, dass rund 2,1 Mio. der im Modell abgebildeten Wohngebäude in Wasserschutzgebieten liegen und damit von der Potenzialanalyse ausgeschlossen werden.

#### Vorkommen von Gips oder Anhydrid

Auch Gebiete mit vorhandenem Vorkommen von Gips oder Anhydrid sind nicht für die Einbringung von Erdsonden geeignet. Hintergrund ist, dass diese Schichten stark hygroskopisch sind. Kommen diese durch die Bohrung mit Wasser in Kontakt, zum Beispiel durch unter Druck stehendes Grundwasser, dann quellen diese Schichten auf. Dies kann zur Anhebung des Geländes an der Erdoberfläche führen. Derartige Hebungen sind in Deutschland bereits mehrfach aufgetreten. Um diese Einschränkung im Modell zu berücksichtigen, werden Daten nach [154] verwendet. Das Ergebnis zeigt, dass nur knapp 40.000 Wohngebäude hierdurch ausgeschlossen werden.

Abbildung 7-10 zeigt sowohl Wasserschutzgebiete als auch Vorkommen von Gips oder Anhydrid in Deutschland.



Wasserschutzgebiete: © WasserBLiCK/BfG und Zuständige Behörden der Länder, 2020

Vorkommen von Gips oder Anhydrid: BSK1000 V1.2, © BGR, Hannover, 2007

Administrative Grenzen: © GeoBasis-DE / BKG-2017 | Generalisierung FfE

Abbildung 7-10: Wasserschutzgebiete und Vorkommen von Gips oder Anhydrid, eigene Darstellung von Daten aus [155] und [154]

## 7.3 Ergebnisse

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse zur Ermittlung des Potenzials von Erdwärmepumpen zusammengefasst. Die Darstellung der Ergebnisse in Boxplots ist zu Beginn von Kapitel 4.3 erläutert.

### 7.3.1 Zwischenergebnisse

Zur Ermittlung des Potenzials von Erdwärmepumpen wird anhand des in Kapitel 7.2 beschriebenen Modells die Grundstücksfläche, die Fläche für Erdkollektoren sowie die Anzahl möglicher Erdsonden ermittelt und darauf aufbauend das Wärmeenergieangebot quantifiziert.

#### Grundstücksfläche

In Abbildung 7-11 ist die Grundstücksfläche je Gebäudetyp statistisch ausgewertet. Die Bruttogrundfläche der Gebäude im Erdgeschoss ist hierbei bereits abgezogen.

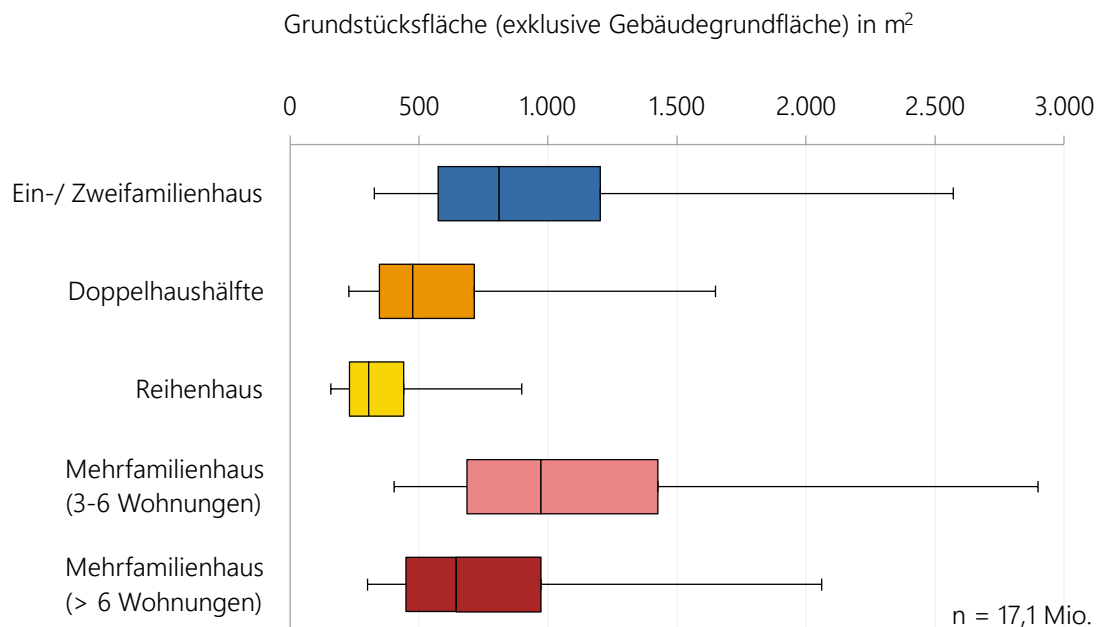


Abbildung 7-11: Grundstücksfläche je Gebäudetyp

Mit einem Median von 970 m<sup>2</sup> weisen kleine Mehrfamilienhäuser die größte Grundstücksfläche auf. Nach dem Median beurteilt folgen Ein-/Zweifamilienhäuser mit 810 m<sup>2</sup>, große Mehrfamilienhäuser mit 645 m<sup>2</sup>, Doppelhaushälften mit 475 m<sup>2</sup> und Reihenhäuser mit 305 m<sup>2</sup>. Dabei ist erkennbar, dass ein höherer Median auch einen höheren Interquartilsabstand bzw. eine größere Varianz der Grundstücksfläche bedeutet. Die große Spannweite der rechten Antenne zeigt zudem, dass die Fläche in wenigen Fällen auch das Vielfache des Medians betragen kann.

Zur Verifizierung des Erwärme-Modells hinsichtlich der Abbildung der Grundstücksfläche (Methodik siehe Kapitel 7.2.2) wurde eine Stichprobe von 2.761 Grundstücken amtlichen Daten nach [141] gegenübergestellt. Abbildung 7-12 stellt das Verhältnis von modellierter zu tatsächlicher Grundstücksfläche – in der Schrittweite 0,1 – dar.

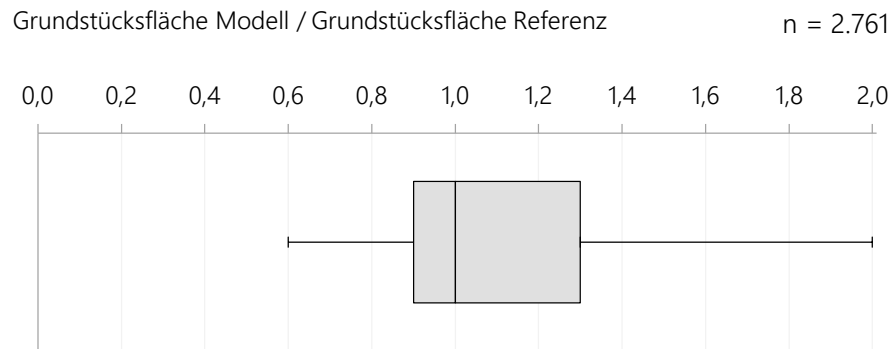


Abbildung 7-12: Grundstücksfläche – Modell vs. Flurstücke, eigene Darstellung auf Basis von Daten nach [141]

Abbildung 7-12 zeigt, dass die Fläche der Grundstücke im Modell mit einem Median von 1,0 in einem großen Teil der Fälle zutreffend abgebildet werden. Unterschätzt wird die Fläche in wenigen Fällen, sodass das Verhältnis des 5. Perzentils 0,6 und das des 1. Quartils 0,9 entspricht. Häufiger tritt eine Überschätzung der Fläche auf. 25 % der Grundstücke sind bis zu 30 % größer als in der Referenz. Weitere 20 % der Grundstücke sind bis zu doppelt so groß. Demnach wird die Grundstücksfläche durch das Modell öfter über- als unterschätzt. Eine Sichtung entsprechender Fälle zeigte, dass Baulücken den angrenzenden Grundstücken mit Gebäuden zugeschlagen werden oder die Grundstücksform deutlich von der der Voronoi-Region abweicht. Eine pauschale Reduktion der Grundstücksflächen anhand eines Korrekturfaktors erfolgt nicht, da hiermit auch korrekt abgebildete Flächen verändert werden würden. Zwischen den Gebäudetypen waren bezüglich der Abweichung von Modell zu Referenz keine relevanten Unterschiede feststellbar. Auch der Vergleich mit der Verteilung der Grundstücksgrößen in Nordrhein-Westfalen nach [15] zeigt, dass die Größenordnung der Modellergebnisse plausibel ist.

### Fläche für Erdkollektoren

Aufbauend auf der Grundstücksgeometrie, den einzuhaltenden Abständen (vgl. Kapitel 7.2.3) und dem Anteil der nutzbaren Grundstücksfläche (vgl. Kapitel 7.2.5) wird die für Erdkollektoren verfügbare Grundstücksfläche bestimmt (siehe Abbildung 7-13).

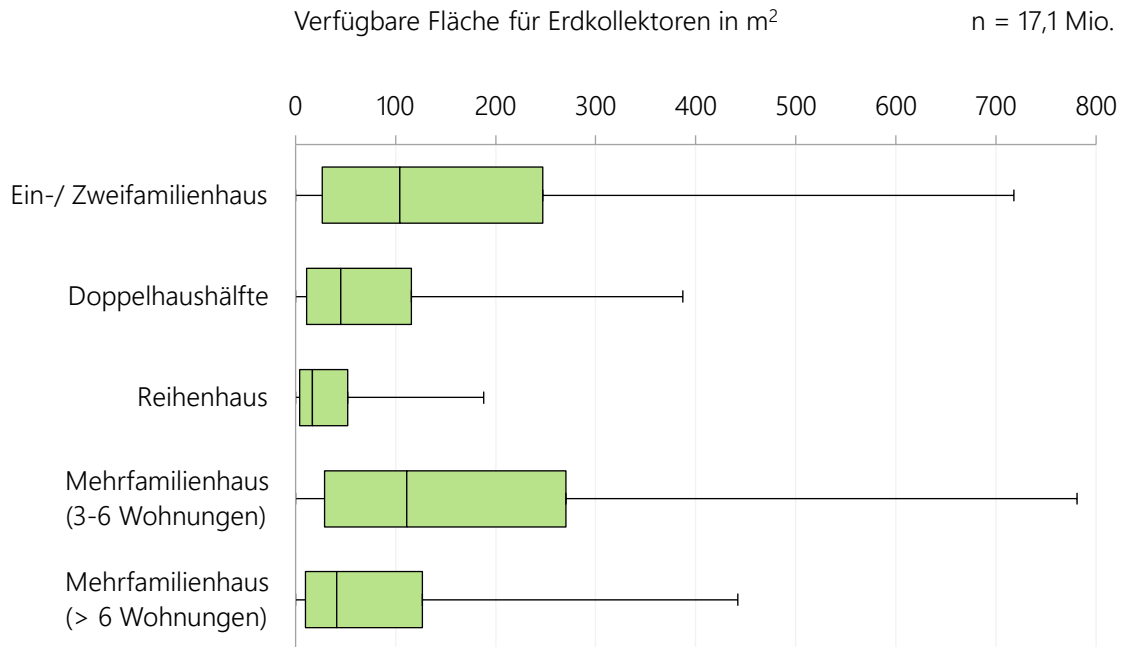


Abbildung 7-13: Verfügbare Fläche für Erdkollektoren je Gebäudetyp

Das Verhältnis zwischen den Gebäudetypen ist mit der Charakteristik der Grundstücksfläche je Gebäudetyp vergleichbar (siehe Abbildung 7-11), wobei die Höhe der Werte durch die einzuhaltenen Abstände sowie die angesetzte Nutzbarkeit der Fläche um ein Vielfaches geringer ausfallen. So können beispielsweise für Ein-/Zweifamilienhäuser von den im Mittel 820 m<sup>2</sup> Grundstücksfläche lediglich 104 m<sup>2</sup> für Erdkollektoren genutzt werden. Nach dem Median beurteilt sind es für Doppelhäuser 45 m<sup>2</sup>, Reihenhäuser 17 m<sup>2</sup>, kleine Mehrfamilienhäuser 111 m<sup>2</sup> und große Mehrfamilienhäuser 41 m<sup>2</sup>.

### Anzahl Erdsonden

Statt der verfügbaren Fläche wird für Erdsonden die mögliche Anzahl ermittelt. Abbildung 7-14 zeigt dieses je Gebäudetyp ausgewertete Modellergebnis, welches unter Berücksichtigung von Abständen (vgl. Kapitel 7.2.4) und der Nutzbarkeit der Grundstücksfläche (vgl. Kapitel 7.2.5) ermittelt wurde.

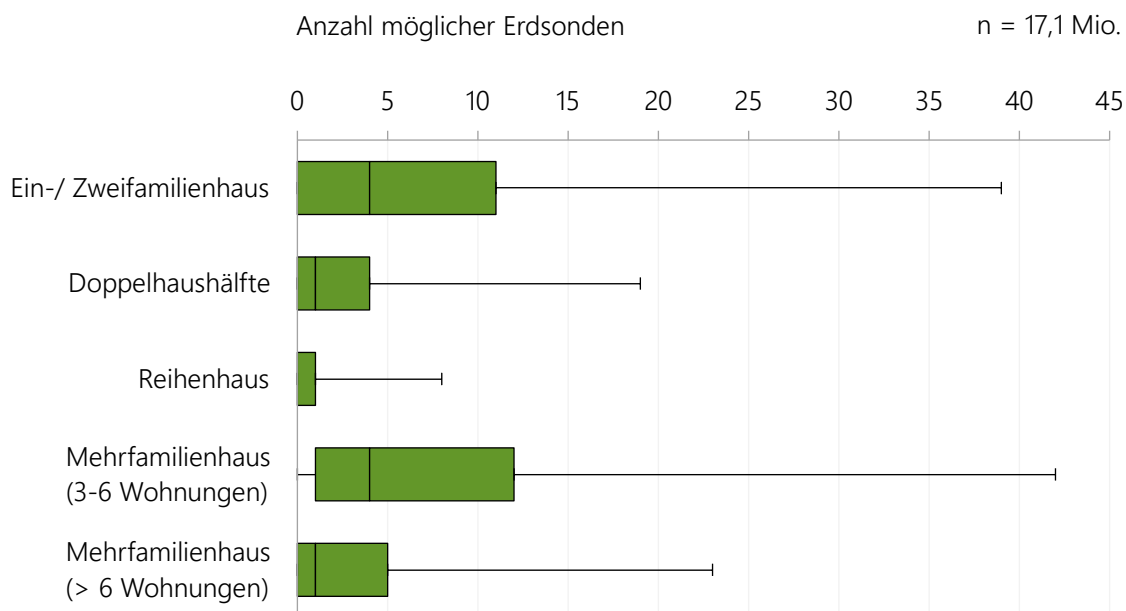


Abbildung 7-14: Anzahl möglicher Erdsonden je Gebäudetyp

Nach dem Median bewertet sind in Ein-/Zweifamilienhäusern und kleinen Mehrfamilienhäusern vier, in Doppelhaushälften und großen Mehrfamilienhäusern eine und in Reihenhäusern keine Erdsonden realisierbar. 50 % der Gebäude weisen diese oder niedrigere Werte auf. Demgegenüber weisen 25 % der Gebäude je Klasse folgende Werte auf: 4 - 11 Erdsonden (Ein-/Zweifamilienhaus), 1 - 4 Erdsonden (Doppelhaus), 0 - 1 Erdsonde (Reihenhaus), 4 - 12 Erdsonden (kleines Mehrfamilienhaus) und 1 - 5 Erdsonden (Großes Mehrfamilienhaus). Weitere 20 % der Gebäude je Klasse weisen eine noch höhere Anzahl möglicher Erdsonden auf (siehe rechte Antennen).

### Wärmeenergieangebot

Anhand der Fläche für Erdkollektoren sowie der Anzahl an Erdsonden kann in Kombination mit der entsprechenden Entzugsarbeit (vgl. Kapitel 7.2.6) und der modellierten Effizienz der Wärmepumpe (vgl. Kapitel 5) das Wärmeenergieangebot berechnet werden. Dieses ist in Abbildung 7-15 für Erdsonden und Erdkollektoren je Gebäudetyp dargestellt. Um eine direkte Gegenüberstellung mit den Ergebnissen des Wärmeenergiebedarfs je Gebäudetyp (vgl. Abbildung 4-22) sowie dem Angebot der weiteren Wärmequellen zu ermöglichen, ist die Abszisse auf den Wert 220 begrenzt. Antennen, welche darüber hinaus gehen sind gekennzeichnet und der Wert des 95. Perzentils ist jeweils angegeben.

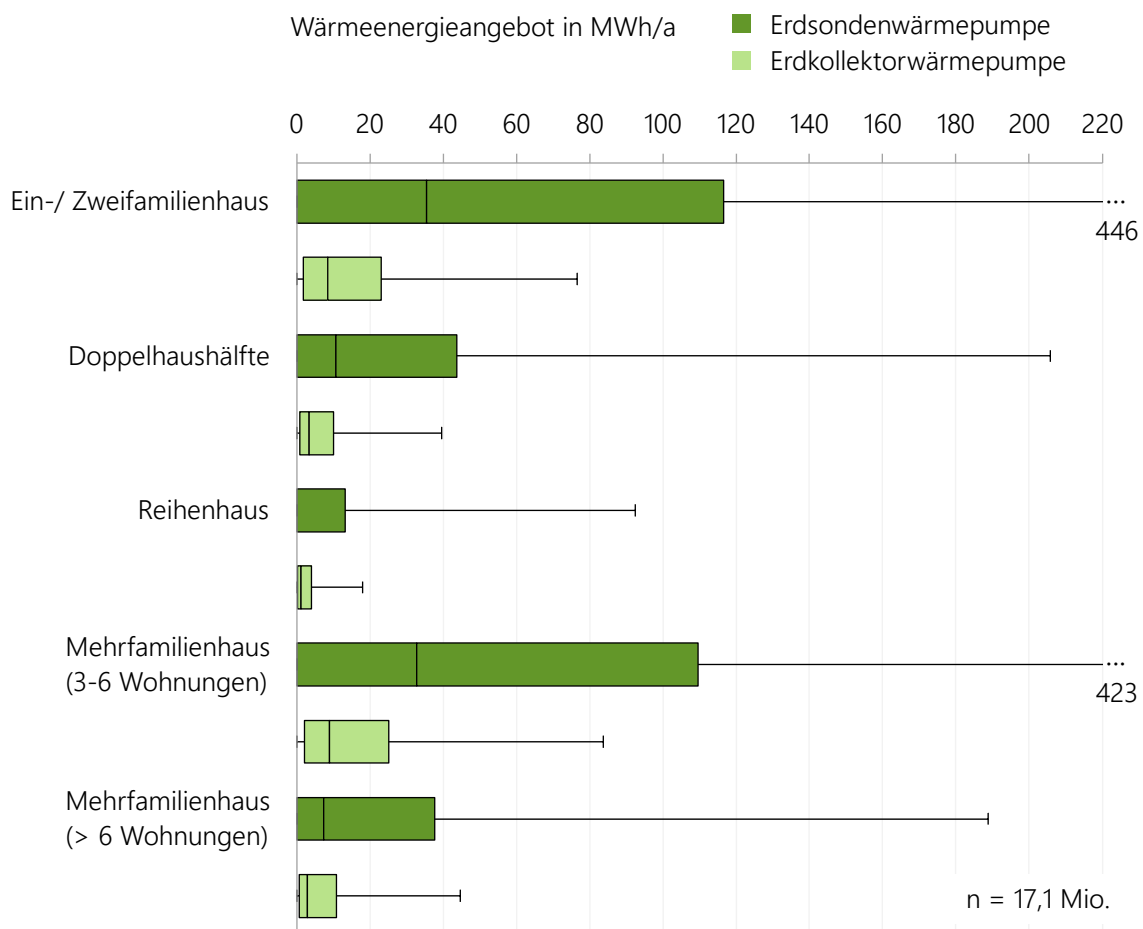


Abbildung 7-15: Wärmeenergieangebot von Erdsonden- bzw. Erdkollektorwärmepumpen je Gebäudetyp

Für Erdsonden zeigt Abbildung 7-15 eine große Schwankungsbreite bzgl. des Wärmeenergieangebots. Beispielsweise beträgt der Interquartilsabstand für Ein-/ Zweifamilienhäuser 117 MWh/a. Diese hohe Variation lässt sich maßgeblich auf die verschiedene Anzahl an Erdsonden und die unterschiedlichen Bohrtiefen zurückführen. Der Interquartilsabstand des Wärmeenergiebedarfs dieses Gebäudetyps beträgt lediglich 19 MWh/a. Diese Gegenüberstellung zeigt, dass es viele Fälle gibt, in denen das Angebot an Wärmeenergie aus Erdsondenwärmepumpen deutlich größer oder deutlich kleiner als der Bedarf zur Wärmeversorgung ist. Für Doppelhäuser und kleine Mehrfamilienhäuser trifft diese Aussage ebenfalls zu. Für Reihenhäuser und große Mehrfamilienhäuser fällt das Angebot von Wärmeenergie mit Erdsonden im Vergleich zum Bedarf gering aus.

Für Erdkollektoren fällt das Wärmeenergieangebot insgesamt deutlich geringer aus. Dies liegt v. a. an der geringeren Entzugsarbeit auf gleicher Grundstücksfläche. Für Ein-/ Zweifamilienhäuser liegt das Angebot unterhalb aber nahe der Größenordnung des Bedarfs an Wärmeenergie. In der Klasse kleine Mehrfamilienhäuser ist dieses Verhältnis bereits ungünstiger und für alle weiteren Gebäudetypen liegt das Angebot von Erdkollektorwärmepumpen deutlich unter dem Bedarf an Wärmeenergie.



### 7.3.2 Potenzial von Erdwärmepumpen

Das in Kapitel 7.2 erläuterte Erdwärme-Modell liefert folgende Kernergebnisse:

47 % der 17,1 Mio. analysierten Gebäude sind für eine Erdsondenwärmepumpe geeignet.

24 % der 17,1 Mio. analysierten Gebäude sind für eine Erdkollektorwärmepumpe geeignet.

Diese technischen Potenziale werden durch den Vergleich von Wärmeenergiebedarf (entsprechend Kapitel 4) und dem Wärmeenergieangebot von Erdwärmepumpen je Wohngebäude ermittelt. Im Folgenden sind diese Potenziale nach Gebäudetyp, Landkreis, Stadt- bzw. Gemeindetyp und spezifischem Wärmeenergiebedarf differenziert dargestellt. Zudem ist der bereitstellbare Anteil des Wärmeenergiebedarfs ausgewiesen.

#### Potenzial je Gebäudetyp

Abbildung 7-16 zeigt das Potenzial für Erdsonden- bzw. Erdkollektorwärmepumpen je Gebäudetyp.

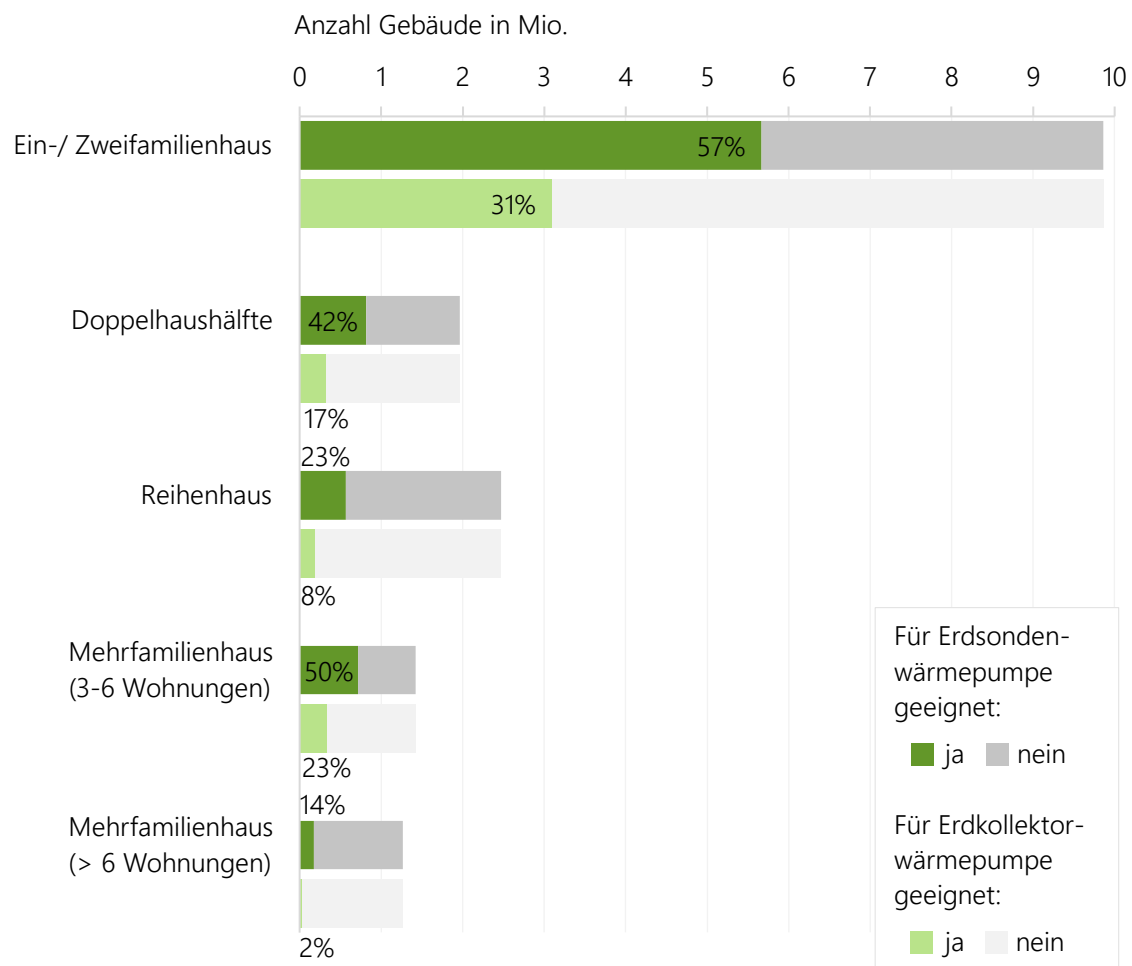


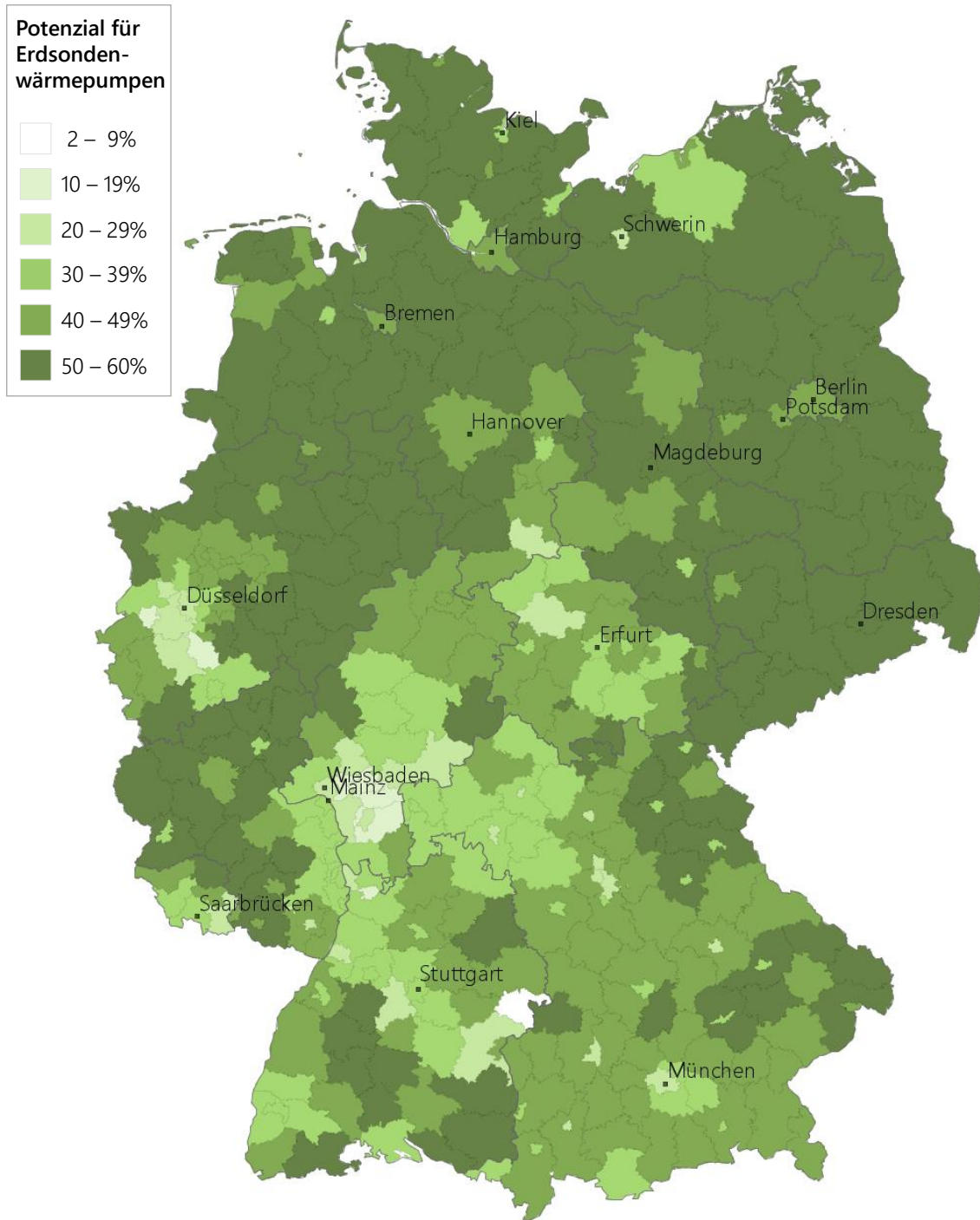
Abbildung 7-16: Potenzial für Erdsonden- und Erdkollektorwärmepumpen je Gebäudetyp

Die Potenzialanalyse zeigt, dass Erdsondenwärmepumpen für 57 % der Ein-/Zweifamilienhäuser, 42 % der Doppelhaushälften, 23 % der Reihenhäuser, 50 % der kleinen und 14 % der großen Mehrfamilienhäuser geeignet sind. Dies entspricht: 5,7 Mio. Ein-/Zweifamilienhäusern, 0,8 Mio. Doppelhaushälften, 0,6 Mio. Reihenhäusern, 0,7 Mio. kleinen Mehrfamilienhäusern und 0,2 Mio. großen Mehrfamilienhäusern. Für Erdkollektorwärmepumpen hingegen sind aufgrund des höheren Bedarfs an verfügbarer Grundstücksfläche deutlich weniger Wohngebäude geeignet: 31 % (3,1 Mio.) der Ein-/Zweifamilienhäuser, 17 % (0,3 Mio.) der Doppelhaushälften, 8 % (0,2 Mio.) der Reihenhäuser,

23 % (0,3 Mio.) der kleinen Mehrfamilienhäuser und 2 % (0,03 Mio.) der großen Mehrfamilienhäuser. Erdkollektorwärmepumpen können demnach v. a. in Ein-/ Zweifamilienhäuser mit ausreichend nutzbarer Grundstücksfläche eingesetzt werden (vgl. auch [138]).

### Potenzial je Landkreis

Nachfolgend ist die räumliche Verteilung des Erdsondenwärmepumpen-Potenzials dargestellt. Abbildung 7-17 zeigt das Potenzial für Erdsondenwärmepumpen je Landkreis.



Administrative Grenzen: © GeoBasis-DE / BKG-2017 | Generalisierung FfE

Abbildung 7-17: Potenzial für Erdsondenwärmepumpen je Landkreis

In vielen Großstädten fällt das Potenzial deutlich geringer als im suburbanen und ländlichen Raum aus. Die Klasse 50 - 60 % ist überwiegend in nördlichen Regionen Deutschlands zu finden, was sich v. a. auf den geringeren Wärmeenergiebedarf aufgrund des maritimen Klimas zurückführen lässt (vgl. Abbildung 4-15).

Das Potenzial für Erdkollektorwärmepumpen je Landkreis ist in Abbildung 14-4 im Anhang dargestellt. Hier zeigt sich im Vergleich zu Abbildung 7-17 eine ähnliche Charakteristik, wobei das Potenzial insgesamt deutlich geringer ausfällt. Es ist ebenfalls ein Nord-Süd-Gefälle erkennbar, wobei die höchsten Werte im Nordosten und die geringsten im Südwesten Deutschlands auftreten. Der geringere Wärmeenergiebedarf sowie die größeren Grundstücksflächen in Norddeutschland überkompensieren die etwas geringere Entzugsarbeit.

### Potenzial je Stadt- bzw. Gemeindetyp

Die Aggregation des Potenzials je Stadt- bzw. Gemeindetyp (Definition nach [80]) zeigt ein deutliches Stadt-Land-Gefälle (vgl. Abbildung 7-18).

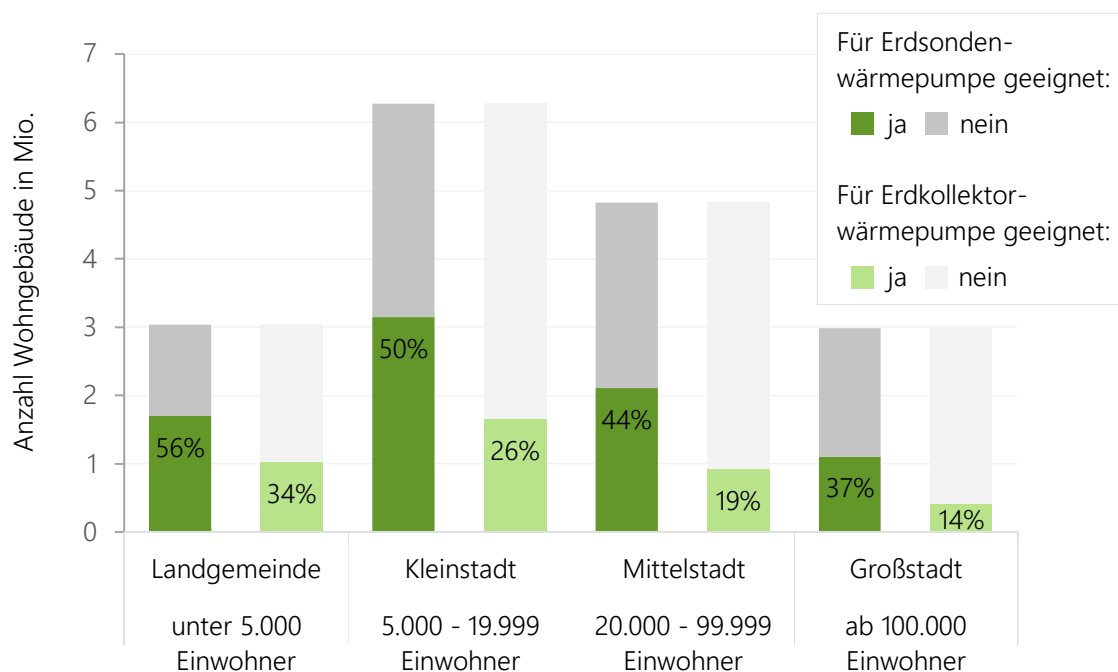


Abbildung 7-18: Potenzial für Erdsonden- und Erdkollektorwärmepumpen je Stadt- bzw. Gemeindetyp

Für Wärmepumpen mit Erdsonden (bzw. Erdkollektor) geeignet sind in Landgemeinden 56 % (34 %), in Kleinstädten 50 % (26 %), in Mittelstädten 44 % (19 %) und in Großstädten 37 % (14 %) der Wohngebäude. Dabei sind 5,2 der 7,8 Mio. für Erdsondenwärmepumpen geeigneten Wohngebäude den Kategorien Klein- bzw. Mittelstadt zuzuordnen. Für Erdkollektoren sind in diesen Klassen ebenfalls 66 % der geeigneten Gebäude enthalten.

### Potenzial in Abhängigkeit des spezifischen Wärmeenergiebedarfs

Abbildung 7-19 zeigt die Verteilung der Wohngebäude nach dem spezifischem Wärmeenergiebedarf sowie deren Eignung für Erdsondenwärmepumpen.

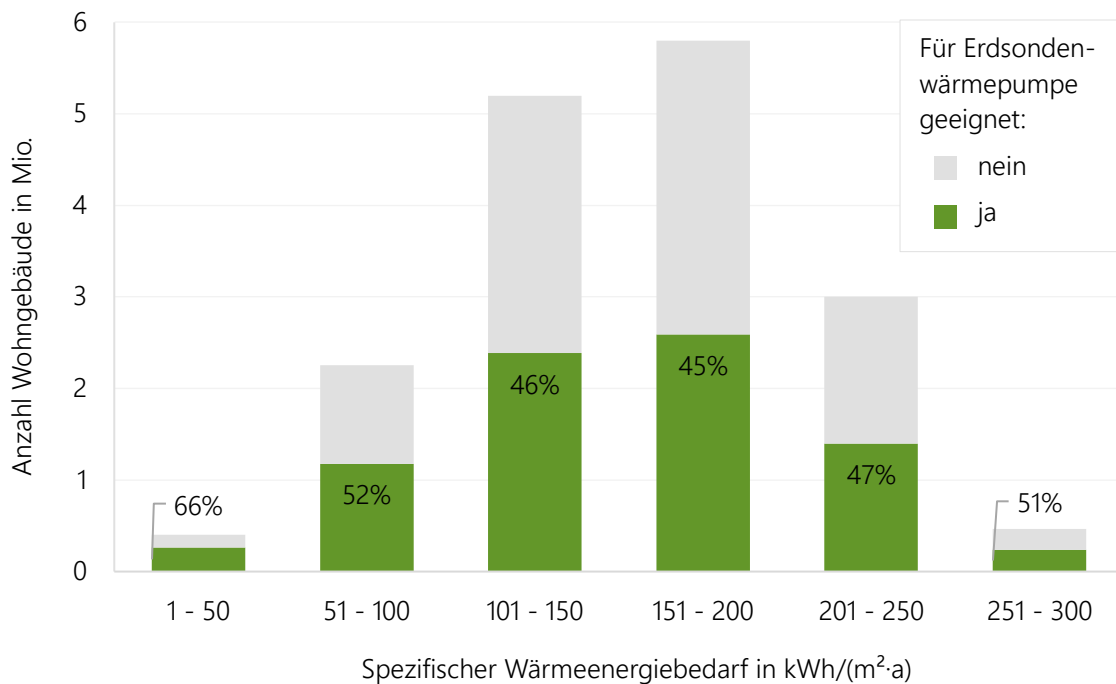


Abbildung 7-19: Potenzial für Erdsondenwärmepumpen in Abhängigkeit des spezifischen Wärmeenergiebedarfs

Wie für Luftwärmepumpen (vgl. Abbildung 6-21) sinkt auch für Erdsondenwärmepumpen der Anteil geeigneter Gebäude mit zunehmendem spezifischem Wärmeenergiebedarf, ab 200 kWh/(m²·a) nimmt dieser wieder zu. Vor allem Einfamilienhäuser weisen Werte über 200 kWh/(m²·a) auf (vgl. Abbildung 4-23) und sind zudem vielfach für Erdsondenwärmepumpen geeignet (vgl. Abbildung 7-16). Die Auswertung der mittleren Grundstücksgröße zeigt, dass einem hohen Bedarf ein noch größeres Angebot an Wärmeenergie entgegensteht. Dies ist auf die größere Grundstücksfläche entsprechender Gebäude zurückzuführen, weshalb diese Aussagen ebenfalls für Erdkolektorwärmepumpen zutreffen.

### Bereitstellbarer Wärmeenergiebedarf

Neben dem Anteil der Gebäude, die für Erdwärmepumpen geeignet sind, wird im Folgenden der durch diese bereitstellbare Wärmeenergiebedarf ausgewertet. Analog zur Definition des Potenzials (vgl. Kapitel 3.1) werden nur Gebäude berücksichtigt, die anhand einer Erdwärmepumpe vollständig mit Wärme versorgt werden können.

41 % des Wärmeenergiebedarfs in Deutschland kann mit Erdsonden und 17 % mittels Erdkollektor jeweils in Kombination mit Wärmepumpen bereitgestellt werden. Dies sind 6 bzw. 7 Prozentpunkte weniger als nach Anzahl der Gebäude bewertet (vgl. Beginn von Kapitel 7.3.2). Demnach sind Gebäude mit geringerem Wärmeenergiebedarf häufiger für Erdwärmepumpen geeignet als solche mit höherem. Abbildung 7-20 zeigt den bereitstellbaren Wärmeenergiebedarf je Gebäudetyp.

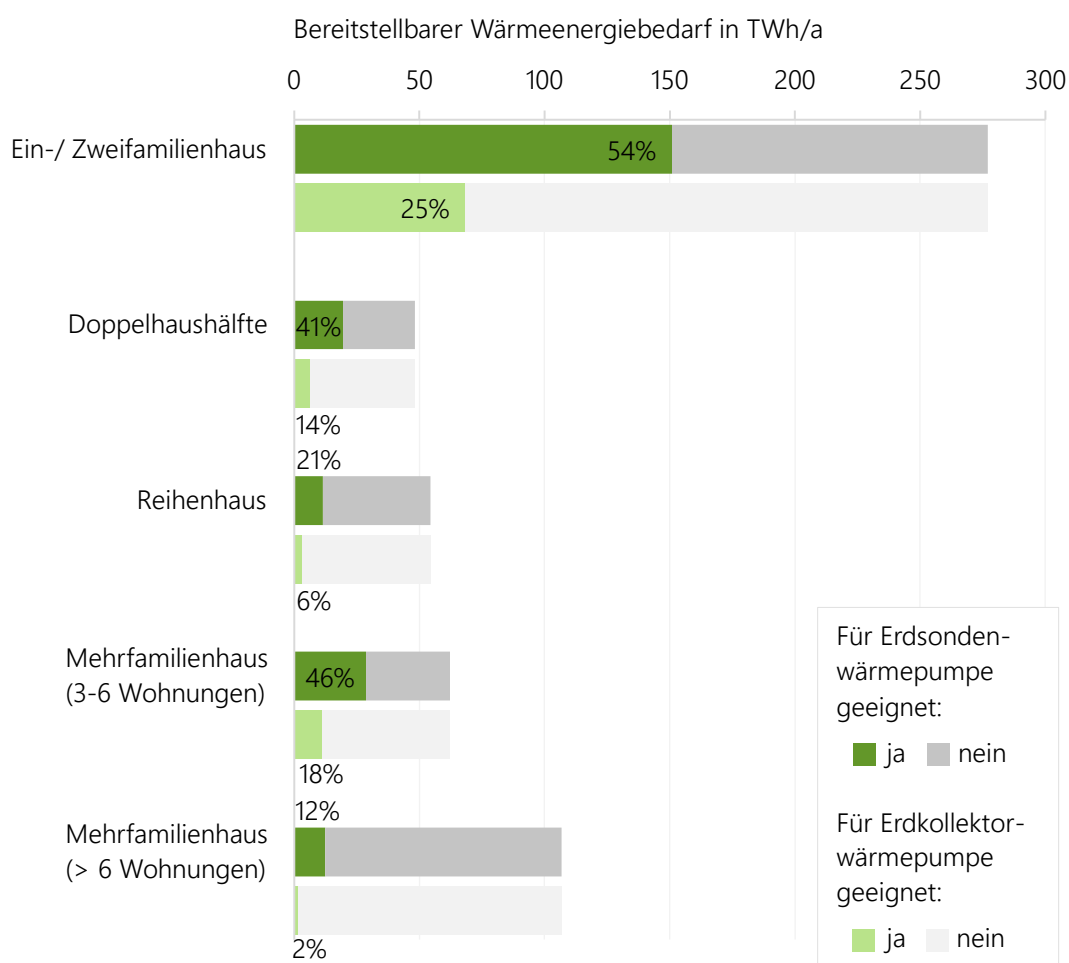


Abbildung 7-20: Bereitstellbarer Wärmeenergiebedarf durch Erdsonden- bzw. Erdkollektorstwärmepumpen je Gebäudetyp

Der Anteil des bereitstellbaren Wärmeenergiebedarfs nimmt im Vergleich zu dem Anteil der mit Wärme versorgbaren Gebäude in der Klasse große Mehrfamilienhäuser am stärksten ab (-15 % bzw. -31 %). Die geringsten Veränderungen erfahren die Anteile der Doppelhäuser (-3 % bzw. -17 %). Für Erdkollektorstwärmepumpen nehmen die Anteile dabei deutlich stärker ab als für Erdsondenwärmepumpen.

Für Nordrhein-Westfalen wurde in [14] auf Basis von [15] ermittelt, dass im Basisszenario 62 % des Wärmeenergiebedarfs von Gebäuden mit Erdsondenwärmepumpen bereitgestellt werden können. Im Vergleich beträgt der durch das Erdwärme-Modell berechnete Wert in Nordrhein-Westfalen 48 %. Die unterschiedliche Größenordnung lässt sich auf Unterschiede in der Methodik zurückführen.

Beispielsweise wird in [14] die Nutzbarkeit der Grundstücksfläche nicht berücksichtigt. Das Stadt-Land-Gefälle der Ergebnisse hingegen fällt ähnlich aus.

### 7.3.3 Sensitivitätsanalyse

Zur Bewertung des Einflusses von in der Praxis vorkommenden Parametervariationen auf das Ergebnis wird die nachfolgend beschriebene Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse aus Kapitel 7.3.1 und 7.3.2 stellen dabei die Referenz dar.

Eine Untersuchung von Varianten ist nicht zwingend erforderlich, da die Parameter im Erdwärme-Modell linear in die Berechnung eingehen.

#### Wärmeenergiebedarf vs. Wärmeenergieangebot Erdsonde

Neben den beschriebenen Varianten wird nachfolgend das Verhältnis von Bedarf und Angebot analysiert. Abbildung 7-21 zeigt anhand der Ordinate den Anteil der Gebäude, deren Verhältnis von Wärmeenergiebedarf und -angebot für Erdsondenwärmepumpen (Referenzfall) kleiner gleich dem auf der Abszisse angegebenen Wert ist.

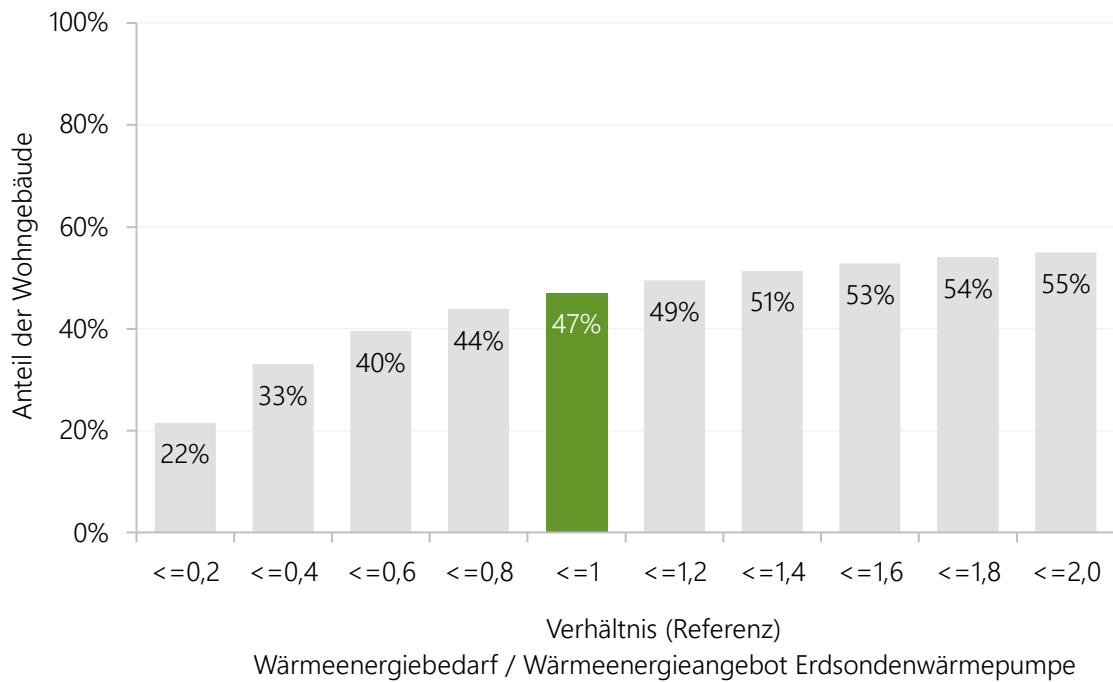


Abbildung 7-21: Anteil der Gebäude gegenüber dem Verhältnis von Wärmeenergiebedarf zu Wärmeenergieangebot Erdsondenwärmepumpe

Die Robustheit des Potenzials lässt sich in Abbildung 7-21 durch die Veränderungen der Parameter Wärmeenergiebedarf und -angebot erkennen. Die auf der Abszisse angegebenen Intervalle links von „<=1“ zeigen für den Referenzfall die Höhe des Überangebots dieser Wärmequelle und die Ordinate den entsprechenden Anteil der Gebäude. Intervalle rechts von „<=1“ beninhalten zudem Gebäude die in der Referenz ein Unterangebot von Erdsondenwärmepumpen aufweisen. Weitere Erläuterungen zur Interpretation dieses Diagramms befinden sich unter Abbildung 6-25.

Anschaulich werden die Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalyse, wenn Hypothesen zur Veränderung des Bedarfs oder des Angebots an Wärmeenergie formuliert werden. Diese können z. B. so lauten:

- **Nutzbare Fläche:** Steht ein 25 % geringerer Anteil der Grundstücksfläche für Erdwärme zur Verfügung als in der Referenz angenommen, dann wären nur noch diejenigen Gebäude geeignet, welche in Abbildung 7-21 der Klasse „ $\leq 0,8$ “ zugeteilt sind (1 geteilt durch 1,25). Dies sind 44 % der Wohngebäude. Diese Annahme führt demnach zu einer Reduktion des Potenzials um 3 Prozentpunkte.
- **Bohrtiefe:** Würden alle Wohngebäude, deren Verhältnis in Abbildung 7-21 größer 1 und kleiner gleich 2,0 ist, eine bis zu doppelt so große Bohrtiefe realisieren können, sodass das resultierende Verhältnis kleiner 1 wäre, dann würde sich das Potenzial auf 55 % erhöhen (abzulesen bei „ $\leq 2,0$ “). Dies würde in einer Erhöhung des Potenzials von 8 Prozentpunkten resultieren.

Abbildung 7-21 und die zugehörigen Beispiele zeigen, dass das Potenzial von Erdsondenwärmepumpen sich trotz deutlicher Variation der Annahmen gegenüber der Referenz nur in geringem Maß verändert.

Die entsprechende Darstellung für Erdkollektorwärmepumpen findet sich in Abbildung 14-5 im Anhang. Hier ist die Steigung zwischen den Säulen stärker ausgeprägt, sodass eine Modifikation der Eingangsparameter zu einer relativ gesehen größeren Veränderung des Potenzials sowohl in positiver als auch negativer Richtung führt. Die Höhe des Potenzials für Erdkollektoren bleibt dabei deutlich hinter dem von Erdsonden zurück, da sich die meisten Parametervariationen in ähnlichem Maße auf beide Technologien auswirken (wie spezifischer Wärmeenergiebedarf, Grundstücksfläche und ihre Nutzbarkeit).

## 7.4 Zwischenfazit

---

Das Erdwärme-Modell untersucht die Einsatzmöglichkeiten von Wärmepumpen mit Erdsonden bzw. Erdkollektoren (Horizontalkollektor, Kapillarrohrmatte, Erdwärmekorb und Spiralkollektor). Dabei werden die nutzbare Grundstücksfläche, einzuhaltende Abstände, die Entzugsarbeit sowie Ausschlussgebiete abgebildet. Insgesamt wird für 17,1 Mio. als Wohngebäude identifizierte Gebäude eine Bewertung durchgeführt. Das Ergebnis zeigt, dass das Potenzial von Erdsonden mit 47 % höher als das von Erdkollektoren (24 %) ist. In beiden Fällen ist ein ausgeprägtes Stadt-Land-Gefälle erkennbar, wobei das Potenzial in der Großstadt geringer (37 % Erdsonde bzw. 14 % Erdkollektor) und in Landgemeinden größer (56 % bzw. 34 %) ist. Dementsprechend fällt das Potenzial von Erdwärmepumpen für die Gebäudetypen Ein-/ Zweifamilienhaus, kleines Mehrfamilienhaus und Doppelhaus-hälfte höher als das von Reihenhäusern und großen Mehrfamilienhäusern aus.

Das beschriebene Erdwärme-Modell weist folgende Möglichkeiten zur Weiterentwicklung auf: Je Gebäude wird ein Grundstück angenommen. Fehler können entstehen, wenn sich mehrere Gebäude auf einem Grundstück befinden oder Grundstücke unbebaut sind. Baulücken werden nahegelegenen Grundstücken zugerechnet, wodurch die Grundstücksfläche in diesen Fällen überschätzt wird. Eine mögliche Detaillierung des Erdwärme-Modells bietet die Aufbereitung amtlicher Daten zu Grundstücksgeometrien, welche für einen Teil der Bundesländer verfügbar sind. Der höhere Detailgrad, speziell die n:m-Beziehung von Gebäuden und Flurstücken, würde dabei zu einer deutlichen Erhöhung der Komplexität führen. Außerdem könnten Grundstücksteile ausgeschlossen werden, welche aufgrund ihrer geringen Fläche, ihrer schmalen Form oder der weiten Entfernung zu anderen Grundstücksteilen für die Erschließung von Erdwärme unattraktiv sind. Wie für die Grundstücksgeometrie sind auch für die mögliche Bohrtiefe und die Entzugsleistung von Erdsonden keine flächendeckenden Daten verfügbar. Deshalb basieren die Modellergebnisse für Erdsonden bzgl. der Bohrtiefe auf einem statistischen Ansatz bzw. hinsichtlich der Entzugsleistung auf Annahmen. Die Veröffentlichung bundesweiter Daten zur möglichen Bohrtiefe sowie zur Wärmeleitfähigkeit im Untergrund beispielsweise durch die entsprechender Landesämter würde helfen das Erdwärme-Modell diesbezüglich zu erweitern. Darüber hinaus könnten weitere Ausschlusskriterien modelliert werden, die eine Umsetzung im Einzelfall verhindern können. Für Erdsonden sind dies Bohrrisiken (wie Karstgesteine) und für Erdkollektoren die Grabbarkeit (Festgesteine) sowie die Hangneigung (steile, erosionsgefährdete Hänge). Eine weiterführende Analyse zur Nutzbarkeit der Grundstücksfläche z. B. auf Basis von Algorithmen zur Bilderkennung wäre denkbar, jedoch ist die Definition von Nutzungskonkurrenz auch von der subjektiven Wahrnehmung der Grundstückseigentümer:innen abhängig. So können diese als Chance für die Umgestaltung des Gartens oder als nicht akzeptabler Eingriff eingestuft werden. Hier sind die Prämissen im Erdwärme-Modell eher als konservativ einzuordnen.

Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigt, welche Auswirkungen eine systemische Unter- bzw. Überschätzung von Eingangsparametern auf das Potenzial hat. Dabei erweist sich das Potenzial von Erdsondenwärmepumpen als robust und verändert sich erst signifikant durch sehr große Veränderung der Parameter. Das Potenzial von Erdkollektorwärmepumpen hingegen ist stärker von Parametervariationen abhängig. Die Höhe des Potenzials bleibt dabei hinter dem des Potenzials von Erdsonden zurück. Die zusätzliche Abbildung von Grabenkollektoren könnte diese Differenz reduzieren, wobei die automatisierte Modellierung der Grabenform nicht trivial ist.



## 8 Solar/Eisspeicher-Modell

Wärmepumpen mit Solarkollektor und Eisspeicher nutzen die Sonne, die Luft und die Erde als Wärmequellen. Der Eisspeicher dient dabei als Primärquellen-Pufferspeicher für strahlungsarme, kalte Wetterphasen. Diese – im Weiteren Solar/Eisspeicherwärmepumpe genannte – Technologie wurde in der Voranalyse (vgl. Kapitel 3) aufgrund ihrer Verfügbarkeit und Ergiebigkeit ausgewählt, wengleich sie aktuell selten eingesetzt wird. Als Primärquelle werden sogenannte Solar-Luft-Kollektoren typischerweise auf dem Gebäudedach montiert, weshalb die verfügbare Dachfläche untersucht wird. Zur Überbrückung strahlungsarmer, kalter Phasen wird in Bestandsgebäuden meist ein Latentwärmespeicher eingesetzt, wobei für die Erstellung der Baugrube dieser unterirdischen Eisspeicher ausreichend Grundstücksfläche benötigt wird. Das Wärmeenergieangebot wird somit entweder durch die verfügbare Dachfläche für Solar-Luft-Kollektoren oder die für Eisspeicher nutzbare Grundstücksfläche limitiert. Ein Gebäude wird für diese Technologie als geeignet eingestuft, wenn das Wärmeenergieangebot mindestens dem Bedarf an Wärmeenergie entspricht.

In den Kapiteln 8.1 bis 8.3 sind die Grundlagen, Methodik und Ergebnisse des Solar/Eisspeicher-Modells beschrieben. Kapitel 8.4 enthält das Zwischenfazit des Solar/Eisspeicher-Modells.

### 8.1 Grundlagen

Kapitel 8.1 fasst die für die weiteren Kapitel relevanten Grundlagen zu Solar-Luft-Kollektoren und Eisspeichern zusammen.

#### Solar-Luft-Kollektoren

Für Solarthermieanlagen zur direkten Trinkwarmwasser- bzw. Raumwärmebereitstellung werden i. d. R. verglaste Flachkollektoren oder Vakuumröhrenkollektoren eingesetzt, die dafür konzipiert sind die Wärme unmittelbar an den Heizkreis bzw. den Trinkwarmwasserspeicher abzugeben (vgl. [72]). Als Wärmequelle für Wärmepumpen kann auch Wärme bei geringeren Temperaturen genutzt werden, um das Kältemittel zu verdampfen (vgl. Kapitel 5.1). Um an strahlungsarmen Tagen möglichst viel Wärme aus der Außenluft entziehen zu können, werden sogenannte Solar-Luft-Kollektoren eingesetzt. Tabelle 8-1 beschreibt drei Varianten von Solar-Luft-Kollektoren.

Tabelle 8-1: Varianten von Solar-Luft-Kollektoren nach [156]

Variante	Beschreibung
Unverglaster Kunststoffkollektor	Diese Kollektorart dient als direkte Wärmequelle für Wärmepumpen und zur Regeneration des Eisspeichers.
Unverglaster Kollektor mit selektiver Beschichtung	In Abgrenzung zum unverglasten Kunststoffkollektor kann diese Variante auch direkt zur Raumwärmebereitstellung genutzt werden.
Verglaster, selektiver Flachkollektor mit aktiver Hinterlüftung (Ventilator)	Diese Kollektorart kann neben den genannten Anwendungen auch direkt zur Trinkwarmwasserbereitstellung eingesetzt werden.

Welche Variante im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigt wird ist in Kapitel 8.2.1 beschrieben.

## Eisspeicher

Zur Überbrückung strahlungsarmer, kalter Phasen wird ein Eisspeicher eingesetzt (vgl. Kapitel 3.2.4).

Der Eisspeicher ermöglicht die Speicherung von Energie der Wärmequelle auf einem niedrigerem Temperaturniveau. Die für die Wärmepumpe bereitgestellte Quelltemperatur variiert je nach Betriebsweise und Wetter und liegt typischerweise zwischen  $-10^{\circ}\text{C}$  bis  $+25^{\circ}\text{C}$ . Der Großteil der Energie, die dem Wärmespeicher entzogen werden kann, entspricht dem Phasenübergang von flüssig zu fest. Bei der Vereisung von Wasser können  $93 \text{ Wh/kg}$  an Wärme entzogen werden. Die Regeneration des Eisspeichers erfolgt durch Solar-Luft-Kollektoren und das umgebende Erdreich. [156]

## 8.2 Methodik

Dieses Kapitel beschreibt die Methodik zur Quantifizierung des Angebots von Solar-Luft-Kollektoren bzw. Eisspeichern als Wärmequelle zur Berechnung des Potenzials unter Berücksichtigung der nötigen Dach- bzw. Grundstücksfläche. Die modellierten Parameter und deren Zusammenhänge werden in den folgenden Unterkapiteln näher erläutert. Abbildung 6-3 gibt hierzu einen Überblick.

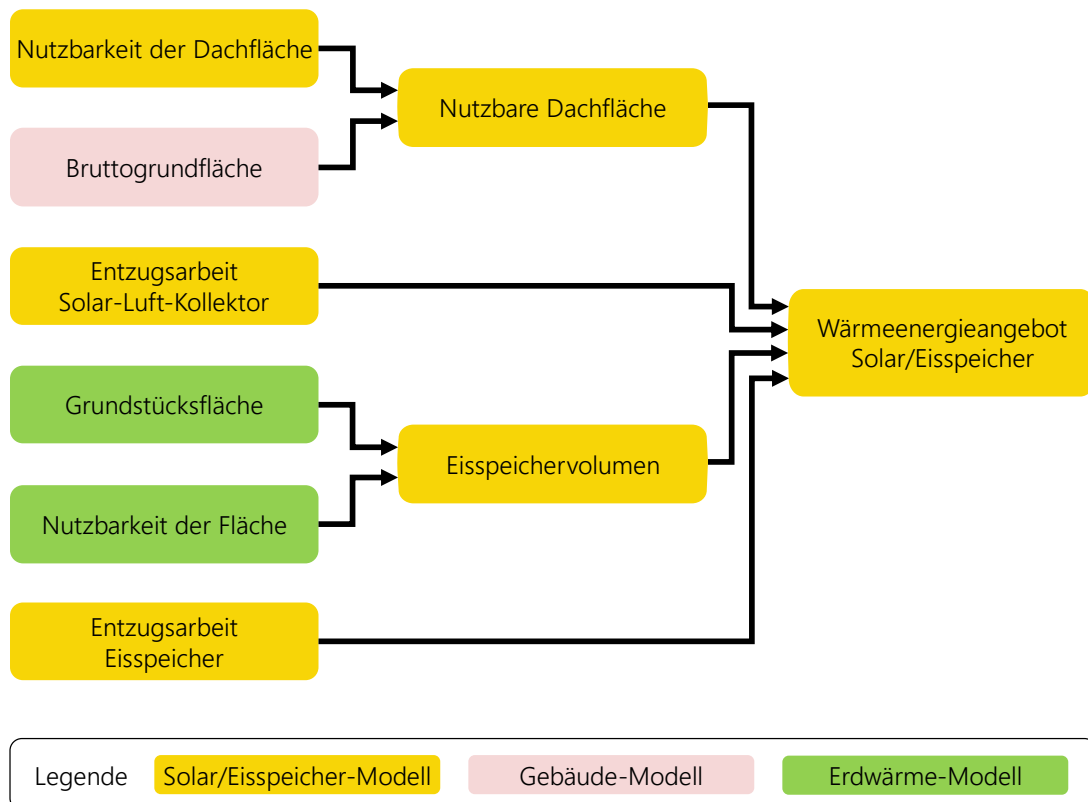


Abbildung 8-1: Überblick Methodik Solar/Eisspeicher-Modell

In Kapitel 8.2.1 wird der Untersuchungsrahmen spezifiziert. Daraufhin wird die Quantifizierung der nutzbaren Dachfläche erläutert (Kapitel 8.2.2). Weiter ist in Kapitel 8.2.3 die Vorgehensweise zur Ermittlung des möglichen Eisspeichervolumens auf Basis der verfügbaren Grundstücksfläche bzw. deren Nutzbarkeit beschrieben. In Kapitel 8.2.4 wird die Berechnung des Wärmeenergieangebots aus der Kombination von Solar-Luft-Kollektoren und Eisspeicher erläutert, um darauf aufbauend das Potenzial von Solar/Eisspeicherwärmepumpen quantifizieren zu können.

## 8.2.1 Untersuchungsrahmen

Dieses Kapitel beschreibt welche Varianten zur Erschließung analysiert werden und welche Einflussfaktoren für die Bewertung des Potenzials von Solar/Eisspeicherwärmepumpen im Modell berücksichtigt werden.

Für diese Wärmequellen-Variante existiert neben verschiedenen Kollektorarten (vgl. Tabelle 8-1) auch eine Vielzahl an verschiedenen Anlagenkonfigurationen (vgl. [72] und [105]). Um die Komplexität zu reduzieren, werden nur unverglaste Kunststoffkollektoren mit Eisspeichern analysiert, da diese serienmäßig in einem für Wohngebäude großen Leistungsbereich erhältlich sind (vgl. [157] und [158]).

Dieses Kapitel zeigt auf, welche Einflussfaktoren für die Bewertung im Solar/Eisspeicher-Modell berücksichtigt werden und welche nicht. Ziel ist es die Restriktionen zu berücksichtigen, die einen relevanten Einfluss auf die Höhe des Potenzials aufweisen. Hierzu werden die Einflussfaktoren bezüglich ihrer Relevanz, Generalisierbarkeit und Datenverfügbarkeit qualitativ bewertet (vgl. Tabelle 8-2). Generalisierbar bedeutet dabei, dass der Einfluss des Effekts im Modell einheitlich abgebildet werden kann, sodass er anhand von automatisierten Algorithmen quantifizierbar ist. Datenverfügbarkeit hingegen bezieht sich auf das Vorhandensein frei zugänglicher Informationen je Gebäude für das gesamte Bundesgebiet.

Tabelle 8-2: Untersuchungsrahmen Solar/Eisspeicher-Modell, eigene Auflistung auf Basis von [67], [156], [72] und [157]

Einflussfaktor	Relevanz	Generalisierbarkeit	Datenverfügbarkeit	Modelliert mit
Nutzbare Dachfläche	✓	○	○	Geodaten /Statistik
Vorhandene Grundstücksfläche	✓	✓	○	Geodaten
Mögliches Eisspeichervolumen	✓	○	○	Geodaten
Nutzbarkeit der Grundstücksfläche	✓	○	○	Statistik
Entzugsarbeit Solar-Luft-Kollektor	✓	✓	x	Literatur
Entzugsarbeit Eisspeicher	✓	✓	x	Literatur
Energiezaun statt Dachkollektor	○	○	x	x
Klimatische Einflüsse auf die Entzugsarbeit	○	✓	x	x
Ausrichtung Dachkollektor	○	○	x	x

✓ = zutreffend; ○ = eingeschränkt zutreffend; x = nicht zutreffend

In den Kapiteln 8.2.2 bis 8.2.4 ist die modellhafte Abbildung der betrachteten Einflussfaktoren – in Tabelle 8-2 grün hervorgehoben – beschrieben.

## 8.2.2 Nutzbare Dachfläche

Der für die Regeneration des Eisspeichers benötigte Solar-Luft-Kollektor wird typischerweise auf dem Dach der Wohngebäude installiert. Hierzu wird Dachfläche benötigt, welche nicht anderweitig (Dachfenster, -aufbauten o. ä.) genutzt wird. Die Bestimmung der nutzbaren Dachfläche basiert auf einer statistischen Auswertung der Daten eines Solardachkatasters. Hierbei wurde die nutzbare Dachfläche von 359.431 Gebäuden analysiert. Diese Daten basieren u. a. auf Laserscanaufnahmen mit einer Punktdichte von vier Punkten pro Quadratmeter, die anhand von Fernerkundungsmethoden ausgewertet wurden [51]. In [159] wurde der Zusammenhang zwischen Gebäudetyp und nutzbarer Dachfläche näher untersucht. Dabei wurden Dachausrichtungen nach Osten, Süden und Westen berücksichtigt. Für die Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von Solar/Eisspeicher-Wärmepumpen wird ein Ansatz zur flächendeckenden Ermittlung der nutzbaren Dachfläche von Wohngebäuden benötigt. Deshalb werden die beschriebenen Daten zur nutzbarer Dachfläche statistisch ausgewertet und auf die im Gebäudemodell vorhandene Bruttogrundfläche der Gebäude bezogen. Abbildung 8-2 zeigt die resultierende Verteilung je Gebäudetyp. Das Verhältnis von nutzbarer Dachfläche zu Bruttogrundfläche des Gebäudes im Erdgeschoss ist in Intervalle mit einer Schrittweite von 10 % unterteilt, wobei jeweils der Mittelwert des Intervalls auf der Abszisse angegeben ist. Eine Differenzierung nach Stadttyp bzw. Siedlungsgebiet wurde geprüft, aber aufgrund mangelnder Korrelation verworfen.

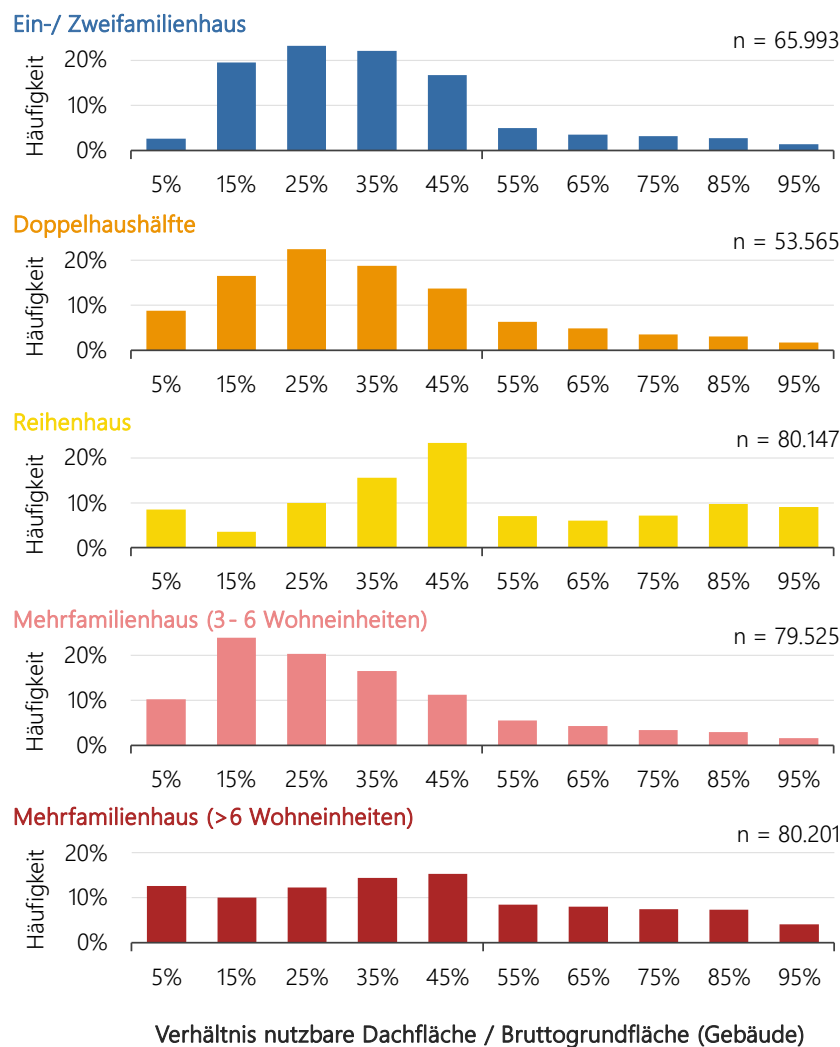


Abbildung 8-2: Nutzbare Dachfläche zu Bruttogrundfläche des Gebäudes je Gebäudetyp, eigene Darstellung auf Basis von Daten nach [51] und [159]

Abbildung 8-2 zeigt, dass in den Klassen der Ein-/ Zweifamilienhäuser und Doppelhäuser Werte von 15 % bis 45 % am häufigsten auftreten. Im Vergleich dazu treten für Reihenhäuser im Mittel höhere Werte und für kleine Mehrfamilienhäuser geringere Werte auf. Für große Mehrfamilienhäuser ist eine breite Verteilung der Werte zu erkennen. Die Zuweisung der Werte auf die Gebäude erfolgt je Postleitzahl zufällig, wobei die Wahrscheinlichkeit (relative Häufigkeit aus Abbildung 8-2) je Gebäudetyp berücksichtigt wird.

### 8.2.3 Realisierbares Eisspeichervolumen

In diesem Kapitel ist beschrieben, in welchem Maß Eisspeicher eingesetzt werden können. Diese Analyse basiert u. a. auf der Grundstücksfläche (vgl. Kapitel 7.2.2) und dem nutzbaren Anteil der Grundstücksfläche (Kapitel 7.2.5) des Erdwärme-Modells.

Eisspeicher werden meist in der Form eines Zylinders aus Beton, teilweise auch aus Kunststoff, hergestellt. Je nach benötigter Kapazität zur Energiespeicherung sind verschiedene Größen erhältlich. Es können auch mehrere Eisspeicher in einer Kaskade eingesetzt werden. Wie bei Erdsonden müssen Abstände zwischen den Eisspeichern, zu Gebäuden und Nachbargrundstücken eingehalten werden. Deshalb kommt dieselbe Methodik wie zur Ermittlung der maximalen Anzahl an Erdsonden (vgl. Kapitel 7.2.4) zum Einsatz. Eine Herausforderung ist die anschließende Berücksichtigung des nutzbaren Anteils der Grundstücksfläche. Dieser Anteil ist nicht auf dem Grundstück verortet und wird erst am Ende der Analyse berücksichtigt. Im Fall des Erdkollektors aber auch der Erdsonde ist dies nicht kritisch, da meist mehrere Sonden bzw. Quadratmeter Kollektor realisierbar sind und die Multiplikation mit dem Anteil nutzbarer Grundstücksfläche und eine anschließende Abrundung kein systematisches Problem darstellt. Würde ein großer Eisspeicher je Grundstück untersucht werden, sodass in vielen Grundstücken nur je ein Stück Platz findet, dann würde die Multiplikation mit einem Anteil der kleiner 1 ist und die anschließende Abrundung stets zu einem Ergebnis von 0 möglichen Eisspeichern führen. Aus diesem Grund werden für alle Gebäude Eisspeicher mit einem Wasservolumen von lediglich  $10 \text{ m}^3$  bzw. einem Durchmesser von 2,7 m [158] analysiert. Sind mehrere Eisspeicher auf einem Grundstück möglich, dann können diese kaskadiert eingesetzt werden. Ist ausreichend Platz vorhanden, würde in der Praxis aufgrund des steigenden Verrohrungsaufwands ein großer statt mehrere kleine Eisspeicher bevorzugt werden. Je höher die Anzahl der so ermittelten Eisspeicher wird, desto mehr weicht das ermittelte Volumen von dem eines großen Speichers auf gleicher Fläche ab. Theoretisch wird der Platzbedarf so überschätzt. Jedoch dürfte auf der dann benötigten kreisrunden Fläche auch keine konkurrierende Nutzung vorhanden sein. Im Modell wird dementsprechend die unter Berücksichtigung der einzuhaltenden Abstände mögliche Anzahl an Eisspeichern mit je  $10 \text{ m}^3$  Wasservolumen ermittelt, anschließend der nutzbare Anteil der Grundstücksfläche multipliziert und abgerundet. Das Ergebnis ist das realisierbare Eisspeichervolumen je Gebäude. Abbildung 8-3 zeigt schematisch die Abmessungen der Baugrube eines Eisspeichers.

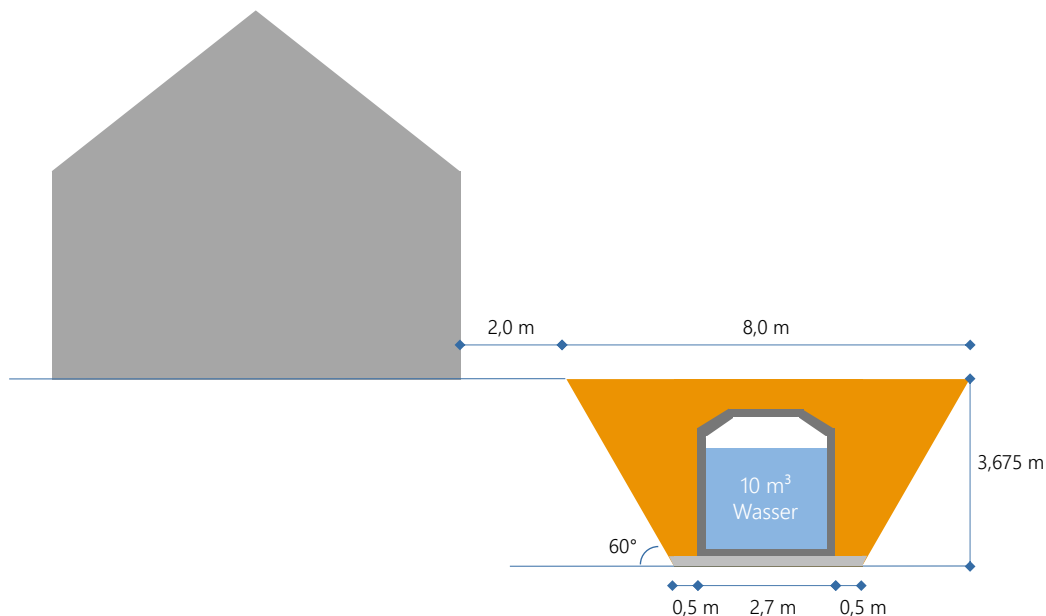


Abbildung 8-3: Platzbedarf für Baugrube eines Eisspeichers mit 60 ° Böschungswinkel

Der Platzbedarf für die Baugrube des bzw. der Eisspeicher wird dabei wie folgt modelliert: Nach [160] ist für die Baugrube ein Böschungswinkel von 45 ° für nicht oder weich bindige Böden bzw. 60 ° für mindestens steif bindige Böden anzusetzen. Dabei werden die in Kapitel 7.2.6.1 beschriebenen Bodenarten Lehm, Schluff und Ton als steif bindig und Sand als nicht bindig gewertet. Weiter wird ein Arbeitsraum von 0,5 m (vgl. [160]) und ein Mindestabstand zum Gebäude von 2 m (vgl. [161]) angesetzt. Der lichte Abstand zwischen zwei Eisspeichern beträgt 2 m [158].

### 8.2.4 Wärmeenergieangebot

Entweder limitiert die verfügbare Fläche für Solar-Luft-Kollektoren oder das mögliche Eisspeichervolumen das bereitstellbare Wärmeenergieangebot. Im Folgenden ist die Berechnung der beiden Größen beschrieben.

#### Solar-Luft-Kollektor

Auf Basis von Herstellerangaben (vgl. [157] und [158]) wird folgende Funktion zur Ermittlung der Heizleistung je Dachfläche verwendet (vgl. Abbildung 8-4). Hierbei wird von Solar-Luft-Kollektoren für die Montage auf Schrägdächern ausgegangen.

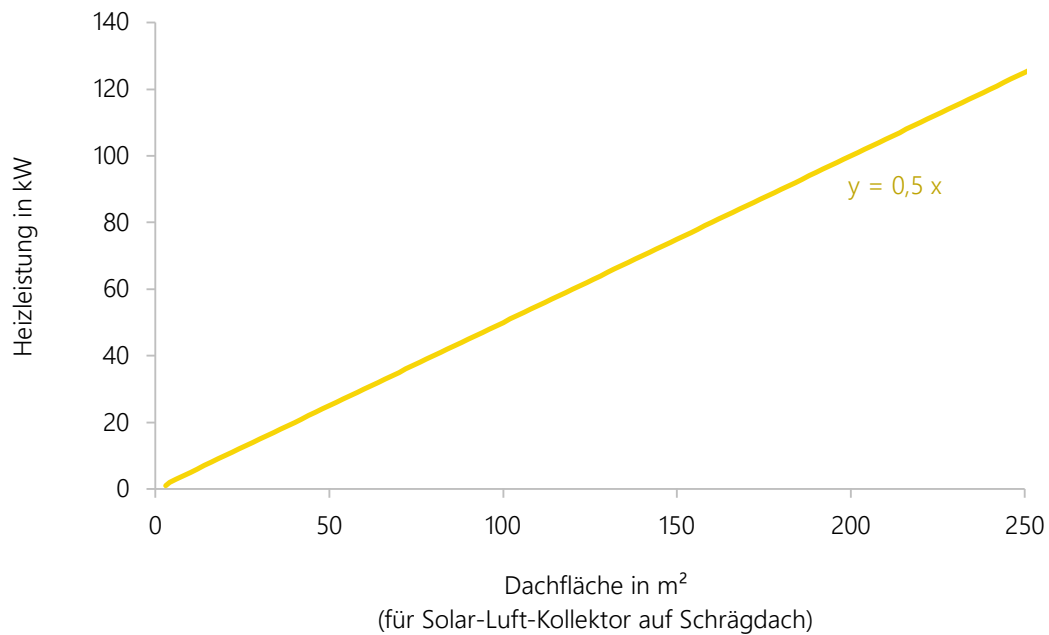


Abbildung 8-4: Dimensionierung Solar-Luft-Kollektor, eigene Darstellung auf Basis von [157] und [158]

Mit der verfügbaren Dachfläche kann die Heizleistung bzw. durch Multiplikation mit den Volllaststunden (vgl. Kapitel 5.2.2) das Wärmeenergieangebot aus Solar-Luft-Kollektoren ermittelt werden.

### Eisspeicher

Die Dimensionierung des Eisspeichers erfolgt auf Basis des Eisspeichervolumens (siehe Kapitel 8.2.3). Für die Modellierung der maximalen Entzugsarbeit wird aus Herstellerangaben nach [157], [158] und [162] folgende Formel abgeleitet (siehe Abbildung 8-5).

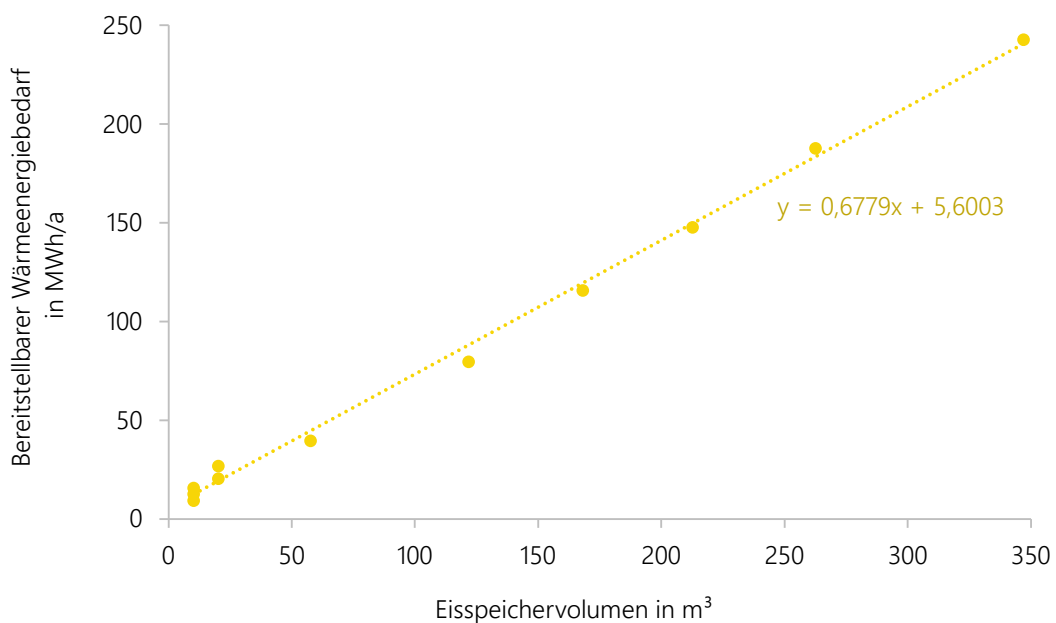


Abbildung 8-5: Dimensionierung Eisspeicher, eigene Darstellung auf Basis von [157], [158] und [162]

## 8.3 Ergebnisse

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse zur Ermittlung des Potenzials von Solar/Eisspeicherwärmepumpen zusammengefasst. Die allgemeine Interpretation der Boxplots ist zu Beginn von Kapitel 4.3 erläutert.

### 8.3.1 Zwischenergebnisse

Zur Ermittlung des Potenzials von Solar/Eisspeicherwärmepumpen wird die nutzbare Dachfläche, das realisierbare Eisspeichervolumen und darauf aufbauend das Wärmeenergieangebot ermittelt.

#### Nutzbare Dachfläche

Das Ergebnis für die nutzbare Dachfläche je Gebäudetyp ist in Abbildung 8-6 dargestellt.

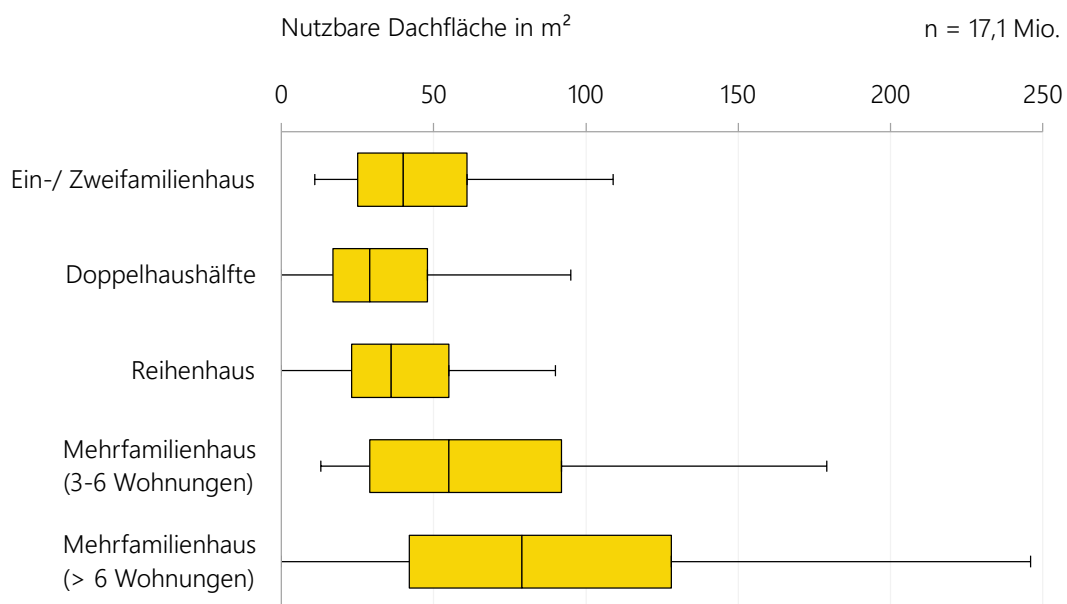


Abbildung 8-6: Nutzbare Dachfläche für Solar-Luft-Kollektoren je Gebäudetyp

Entsprechend dem Median beurteilt nimmt die für Solar-Luft-Kollektoren verfügbare Dachfläche von der Doppelhaushälfte (29 m<sup>2</sup>), zum Reihenhaus (36 m<sup>2</sup>), zum Ein-/Zweifamilienhaus (40 m<sup>2</sup>) über das kleine Mehrfamilienhaus (55 m<sup>2</sup>) hin zum großen Mehrfamilienhaus (79 m<sup>2</sup>) zu. Der Interquartilsabstand der Mehrfamilienhäuser ist dabei deutlich größer als der der weiteren Gebäudetyp-Klassen. Die Antennen in Abbildung 8-6 zeigen, dass die nutzbare Dachfläche zum Teil auch deutlich kleiner oder größer als der Median ist. Dies ist u. a. auf die breite Verteilung des nutzbaren Anteils zurückzuführen (vgl. Abbildung 8-2).



### Realisierbares Eisspeichervolumen

Neben der verfügbaren Dachfläche für Solar-Luft-Kollektoren kann das realisierbare Eisspeichervolumen das Wärmeenergieangebot dieser Technologie limitieren. Das mögliche Eisspeichervolumen wird anhand der in Kapitel 8.2.3 erläuterten Methodik auf Basis der Grundstücksgeometrie und einzuhaltender Abständen geometrisch ermittelt. Zudem wird, wie im Erdwärme-Modell, die Nutzbarkeit der Grundstücksfläche berücksichtigt, die sich durch konkurrierende Nutzungen wie bestehende Bäume o. ä. ergibt. Abbildung 8-7 zeigt die statistische Auswertung der Ergebnisse je Gebäudetyp.

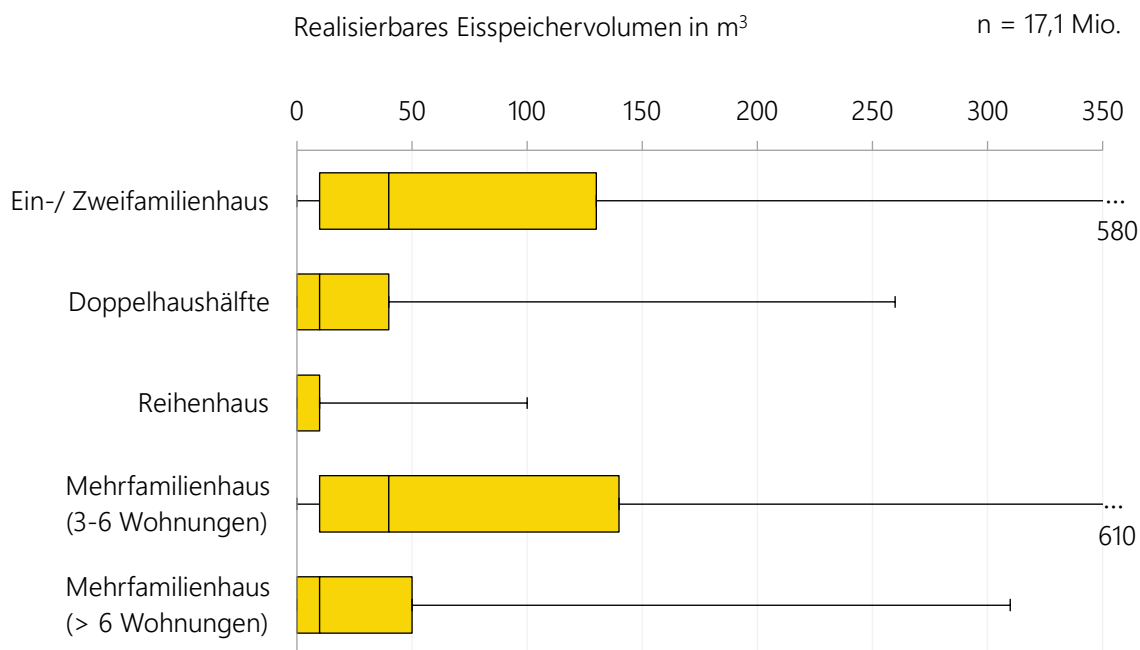


Abbildung 8-7: Mögliches Eisspeichervolumen je Gebäudetyp

Nach dem Median beurteilt beträgt das realisierbare Eisspeichervolumen für Reihenhäuser 0 m<sup>3</sup>, für Doppelhaushälften und große Mehrfamilienhäuser je 10 m<sup>3</sup>, für Ein-/Zweifamilienhäuser und kleine Mehrfamilienhäuser jeweils 40 m<sup>3</sup>. Auffällig ist der große Interquartilsabstand für Ein-/Zweifamilienhäuser und kleine Mehrfamilienhäuser sowie deren rechte Antennen. Dies lässt sich auf die teils große Grundstücksfläche in diesen Klassen (vgl. Abbildung 7-11) zurückführen.

## Wärmeenergieangebot

Anhand dem Eisspeichervolumen und der Dachfläche wird das Wärmeenergieangebot von Solar/Eisspeicherwärmepumpen berechnet (vgl. Kapitel 8.2.4). Abbildung 8-8 zeigt dies anhand von Boxplots je Gebäudetyp.

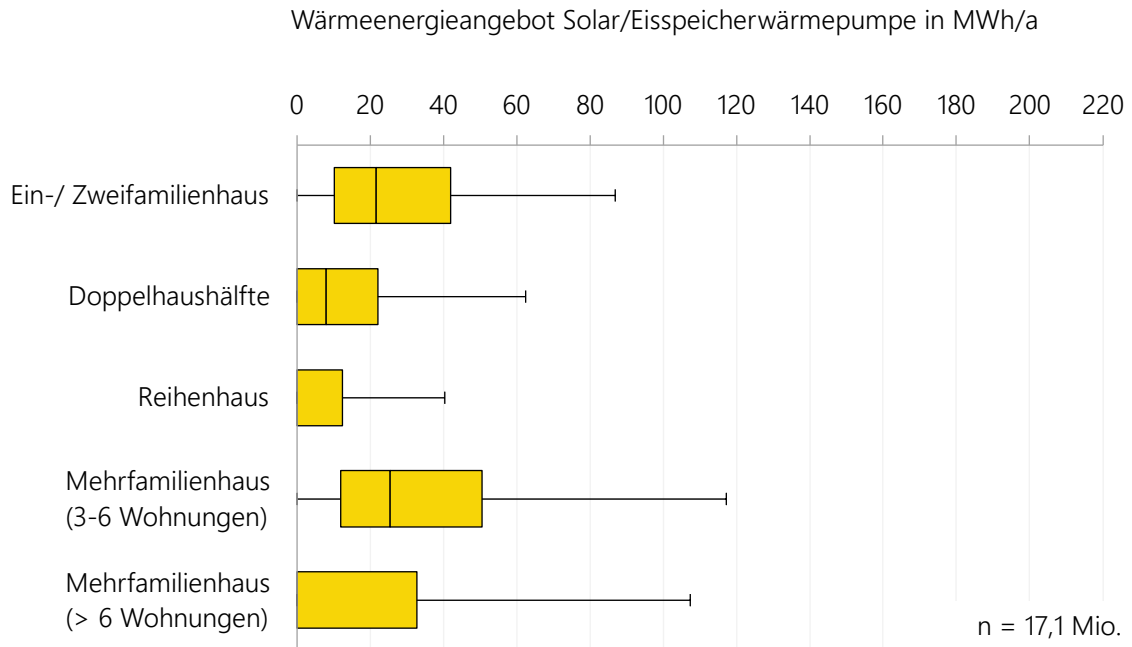


Abbildung 8-8: Wärmeenergieangebot von Solar/Eisspeicherwärmepumpen je Gebäudetyp

In Ein-/ Zweifamilienhäusern beträgt der Median 22 MWh/a, für Doppelhaushälften 8 MWh/a, für Reihenhäuser 0 MWh/a, für kleine Mehrfamilienhäuser 26 MWh/a und für große Mehrfamilienhäuser 0 MWh/a. Das Wärmeenergieangebot wird je Gebäude entweder von der Größe des Solar-Luft-Kollektors oder der des Eisspeichers limitiert. Für 67 % der analysierten Gebäude stellt die Größe des Eisspeichers den limitierenden Faktor dar. Im Vergleich zu Luft- und Erdsondenwärmepumpen (Abbildung 6-17 bzw. Abbildung 7-15) fällt das Wärmeenergieangebot von Solar/Eisspeicherwärmepumpen geringer aus.

### 8.3.2 Potenzial von Solar/Eisspeicherwärmepumpen

Das in Kapitel 8.2 beschriebene Solar/Eisspeicher-Modell liefert folgendes Kernergebnis:

37 % der 17,1 Mio. analysierten Gebäude sind für eine Solar/Eisspeicherwärmepumpe geeignet.

Dieses technische Potenzial wird durch den Vergleich von Wärmeenergiebedarf (vgl. Kapitel 4) und Wärmeenergieangebot von Solar/Eisspeicherwärmepumpen (vgl. Kapitel 8.3.1) je Wohngebäude ermittelt.

Im Folgenden ist dieses Potenzial nach Gebäudetyp, Landkreis, Stadt- bzw. Gemeindetyp und spezifischem Wärmeenergiebedarf differenziert dargestellt. Zudem ist der bereitstellbare Anteil des Wärmeenergiebedarfs ausgewiesen.

#### Potenzial je Gebäudetyp

Abbildung 8-9 zeigt das Potenzial für Solar/Eisspeicherwärmepumpen je Gebäudetyp.

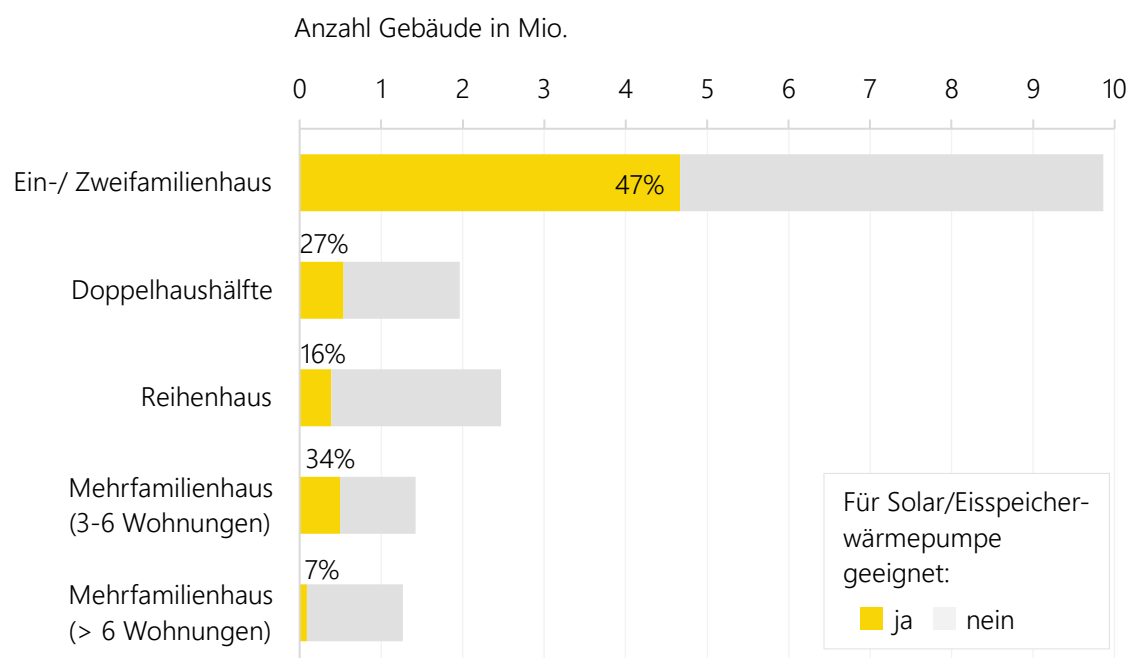
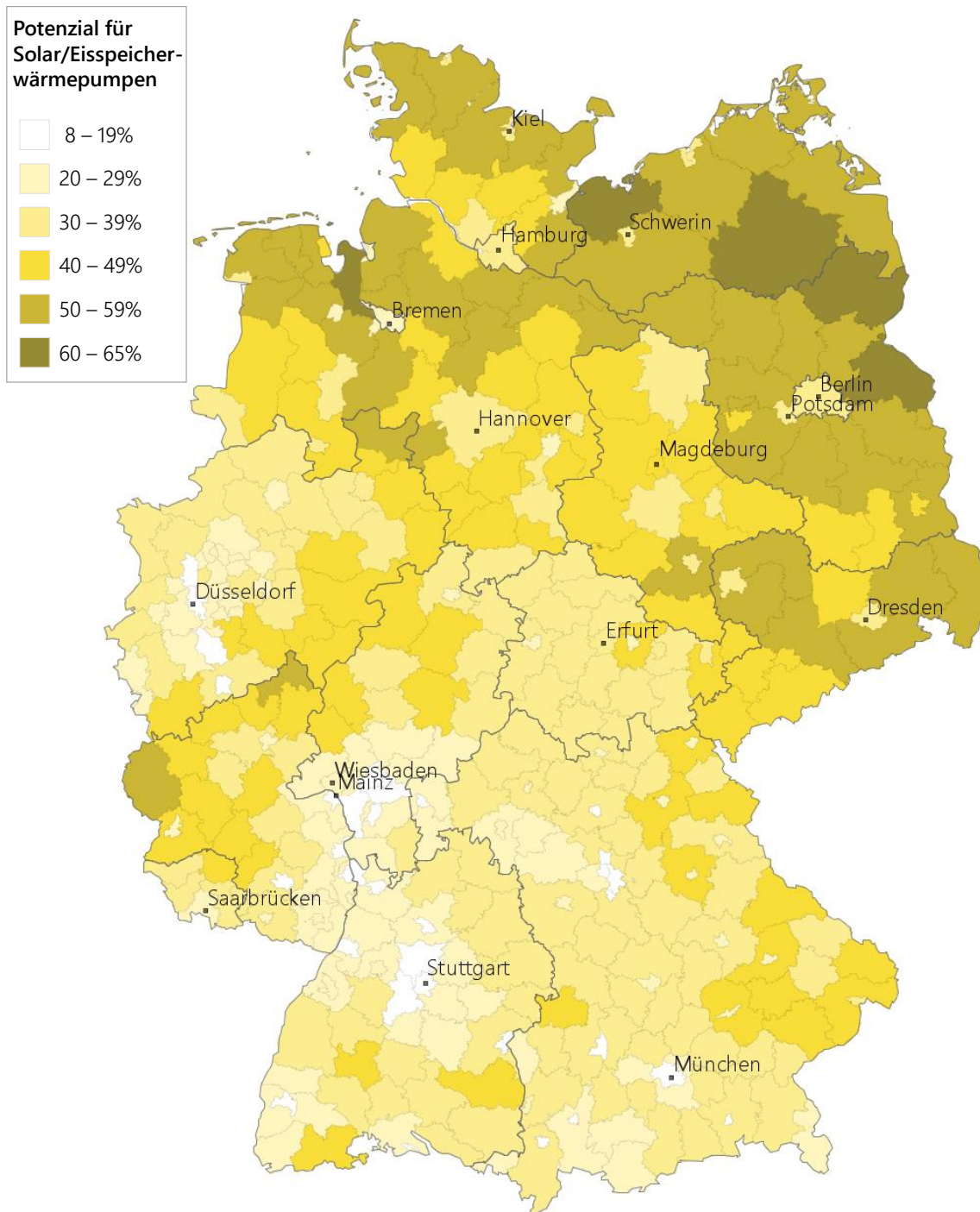


Abbildung 8-9: Potenzial für Solar/Eisspeicherwärmepumpen je Gebäudetyp

Nach der Höhe des Potenzials absteigend sortiert sind 47 % (4,7 Mio.) der Ein-/ Zweifamilienhäuser, 34 % (0,5 Mio.) der kleinen Mehrfamilienhäuser, 27 % (0,5 Mio.) der Doppelhaushälften, 16 % (0,4 Mio.) der Reihenhäuser und lediglich 7 % (0,1 Mio.) der großen Mehrfamilienhäuser für Solar/Eisspeicherwärmepumpen geeignet. Das Potenzial spiegelt dabei das Verhältnis von Angebot (vgl. Abbildung 8-8) und Bedarf (vgl. Abbildung 4-22) von Wärmeenergie je Gebäudetyp wider. Beispielsweise ist die verfügbare Dachfläche für Solar-Luft-Kollektoren und die verfügbare Grundstücksfläche für Eisspeicher für die Wärmeversorgung von Ein-/ Zweifamilienhäuser vielfach ausreichend, während dies für große Mehrfamilienhäuser meist nicht der Fall ist.

### Potenzial je Landkreis

Abbildung 8-10 zeigt das Potenzial von Solar/Eisspeicherwärmepumpen je Landkreis.



Administrative Grenzen: © GeoBasis-DE / BKG-2017 | Generalisierung FfE

Abbildung 8-10: Potenzial für Solar/Eisspeicherwärmepumpen je Landkreis

Das Potenzial in dicht besiedelten Gebieten fällt deutlich niedriger aus als in Gebieten mit geringer Siedlungsdichte. In ländlichen Gebieten fällt das Potenzial in Norddeutschland aufgrund des geringeren Wärmeenergiebedarfs und den größeren Grundstücksflächen größer aus als im Süden.

### Potenzial je Stadt- bzw. Gemeindetyp

Um die Unterschiede von Stadt und Land quantitativ darzustellen, wird das Potenzial je Stadt- bzw. Gemeindetyp entsprechend der Definition von [80] aggregiert (siehe Abbildung 8-11).

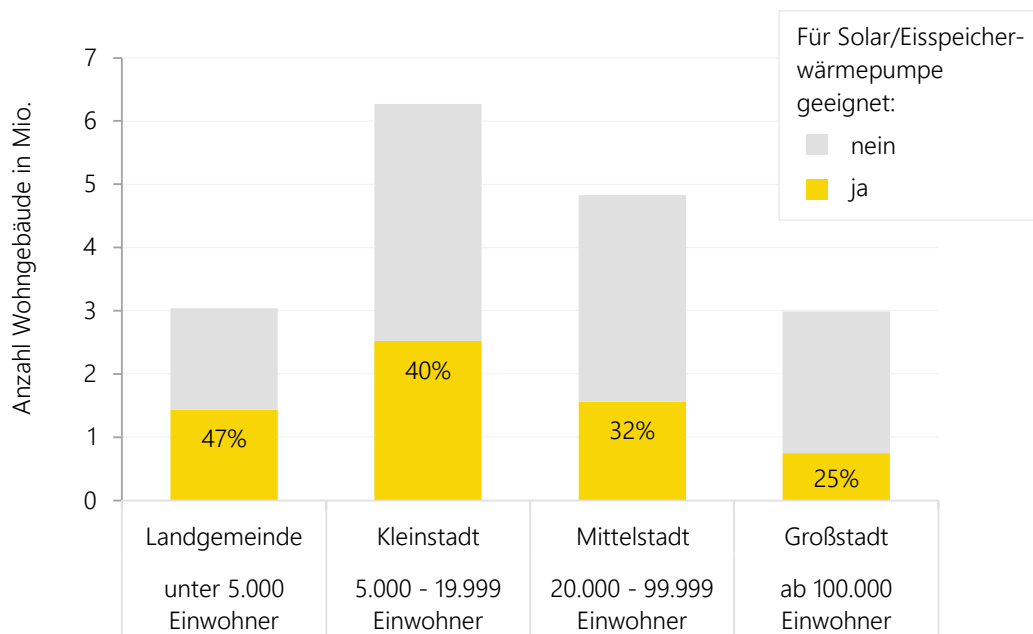


Abbildung 8-11: Potenzial für Solar/Eisspeicherwärmepumpen je Stadt- bzw. Gemeindetyp

Für Solar/Eisspeicherwärmepumpen werden in Landgemeinden 47 %, in Kleinstädten 40 %, in Mittelstädten 32 % und in Großstädten 25 % der Gebäude als geeignet eingestuft. Rund Zweidrittel der 6,3 Mio. geeigneten Gebäude befinden sich somit in Klein- und Mittelstädten.

### Potenzial in Abhängigkeit des spezifischen Wärmeenergiebedarfs

Abbildung 8-12 zeigt die absolute Anzahl und den entsprechenden Anteil der Gebäude, welche für Solar/Eisspeicherwärmepumpen geeignet sind je nach spezifischem Wärmeenergiebedarf.

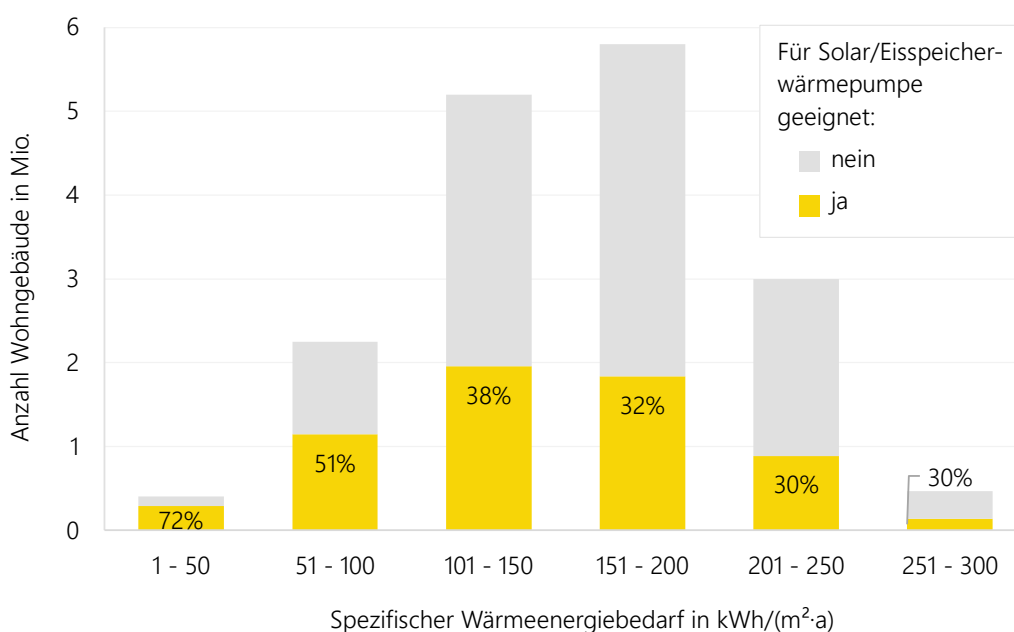


Abbildung 8-12: Potenzial für Solar/Eisspeicherwärmepumpen in Abhängigkeit des spezifischen Wärmeenergiebedarfs

Mit zunehmendem spezifischen Wärmeenergiebedarf nimmt der Anteil geeigneter Gebäude ab. Von 72 % für Gebäude mit 1 – 50 kWh/(m<sup>2</sup>·a) sinkt der Anteil deutlich auf 51 % in der Klasse 51 – 100 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und nimmt dann schrittweise bis auf 30 % für einen spezifischen Wärmeenergiebedarf zwischen 251 – 300 kWh/(m<sup>2</sup>·a) ab. Eine erneute Zunahme des Anteils für sehr hohe spezifische Wärmeenergiebedarfe trifft für Solar/Eisspeicherwärmepumpen, anders als für Luft- und Erdwärmepumpen (vgl. Abbildung 6-21 und Abbildung 7-19), nicht zu. Zwar nimmt die Grundstücksfläche im Vergleich zum Wärmeenergiebedarf tendenziell zu (vgl. Kapitel 7.3.2), die nutzbare Dachfläche hingegen weist diese Charakteristik nicht auf, da es sich überwiegend um Ein-/Zweifamilienhäuser handelt. Somit limitiert in diesen Fällen die nutzbare Dachfläche das Angebot an Wärmeenergie.

### Bereitstellbarer Wärmeenergiebedarf

Neben dem Anteil der Gebäude, die für Solar/Eisspeicherwärmepumpen geeignet sind, ist nachfolgend der bereitstellbare Wärmeenergiebedarf analysiert. Analog zur Definition des Potenzials (vgl. Kapitel 3.1) sind in dieser Bewertung ausschließlich Gebäude berücksichtigt, die mittels Solar/Eisspeicherwärmepumpe vollständig mit Wärme versorgt werden können.

Bezogen auf alle untersuchten Wohngebäude können 28 % des gesamten Wärmeenergiebedarfs anhand von Solar/Eisspeicherwärmepumpen bereitgestellt werden. Dies sind 9 Prozentpunkte weniger als nach Anzahl der Gebäude bewertet. Das liegt daran, dass Gebäude mit einem unterdurchschnittlichen Wärmeenergiebedarf für diese Technologie weniger Dachfläche und Grundstücksfläche benötigen und deshalb häufiger geeignet sind als solche mit höherem Wärmeenergiebedarf. Abbildung 8-13 zeigt diesbezüglich die Unterschiede zwischen den Gebäudetypen auf.

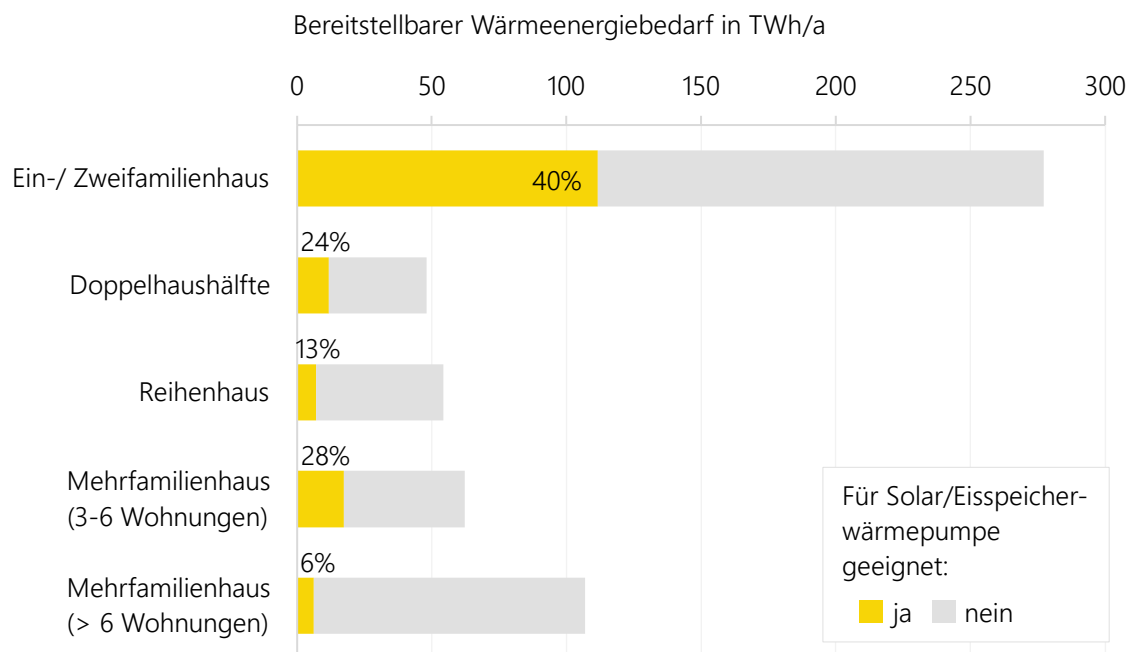


Abbildung 8-13: Bereitstellbarer Wärmeenergiebedarf durch Solar/Eisspeicherwärmepumpen je Gebäudetyp

Der Anteil des bereitstellbaren Wärmeenergiebedarfs liegt im Vergleich zum Anteil der durch Solar/Eisspeicherwärmepumpen mit Wärme versorgbaren Gebäude (vgl. Abbildung 8-9) je nach Gebäudetyp zwischen 11 % (Doppelhaushälfte) bis 20 % (großes Mehrfamilienhaus) zurück. Für Ein-/Zweifamilienhäuser – die Klasse mit dem in Summe höchsten Wärmeenergiebedarf – beträgt der Anteil 40 %.

### 8.3.3 Sensitivitätsanalyse

Zur Einordnung des Einflusses von in der Praxis auftretender Variationen der Parameter auf das Potenzial, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die in Kapitel 8.3.1 und 8.3.2 beschriebenen Ergebnisse bilden dabei die Referenz.

#### Variante Energiezaun statt Dachkollektor

Unter der Annahme, dass keine Dachfläche für Kollektoren benötigt wird, da die Regeneration des Eisspeichers anderweitig z. B. anhand von Energiezäunen (vgl. [157]) erfolgt, führt dies zu einer Erhöhung des Potenzials von lediglich 7 Prozentpunkten. Ob ausreichend Platz für Energiezäune vorhanden ist wird dabei nicht bewertet. Dieses Ergebnis bestätigt, dass die Größe des Eisspeichers bzw. die hierfür verfügbare Grundstücksfläche im Modell häufiger die limitierende Größe darstellt.

#### Wärmeenergiebedarf vs. Wärmeenergieangebot Solar/Eisspeicher

Zur Analyse der Robustheit der Ergebnisse wird das Verhältnis von Bedarf und Angebot näher analysiert. Abbildung 8-14 zeigt anhand der Ordinate den Anteil der Gebäude, deren Verhältnis von Wärmeenergiebedarf und -angebot für Solar/Eisspeicherwärmepumpen (Referenzfall) kleiner gleich dem auf der Abszisse angegebenen Wert ist.

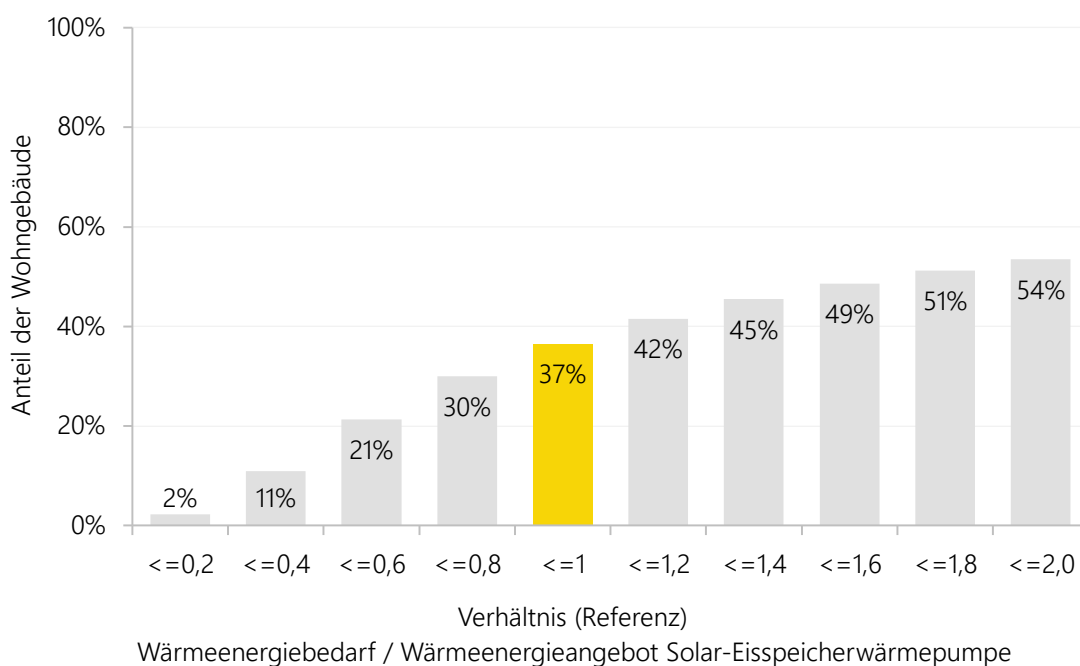


Abbildung 8-14: Anteil der Gebäude gegenüber dem Verhältnis von Wärmeenergiebedarf zu Wärmeenergieangebot Solar/Eisspeicherwärmepumpe

Anhand von Abbildung 8-14 wird die Robustheit des Potenzials durch Veränderungen der Parameter Wärmeenergiebedarf und -angebot überprüft. Die auf der Abszisse angegebenen Intervalle links von „<=1“ zeigen für den Referenzfall die Höhe des Überangebots an nutzbarer Wärmeenergie und die Ordinate den entsprechenden Anteil der Gebäude. Intervalle rechts von „<=1“ beninhalten zusätzlich Gebäude die in der Referenz ein Unterangebot an Wärme von Solar/Eisspeicherwärmepumpen aufweisen. Weitere Erläuterungen zur Interpretation dieses Diagramms befinden sich unter Abbildung 6-25.

Greifbar werden die Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalyse, wenn Hypothesen zur Veränderung des Bedarfs oder des Angebots an Wärmeenergie aufgestellt werden. Diese können beispielsweise folgendermaßen lauten:

- **Überdimensionierung:** In seltenen Perioden mit sehr geringen Außentemperaturen (unterhalb der Normaußentemperatur) kann die Temperatur im Eisspeicher stark absinken und damit die Heizleistung dieser Technologie signifikant reduzieren. Dies kann entweder durch einen elektrischen Heizstab oder eine Überdimensionierung der Anlage kompensiert werden. Würden alle Solar/Eisspeicherwärmepumpen gegenüber der Referenz 25 % überdimensioniert, dann wären nur noch diejenigen Gebäude als geeignet einzustufen, die in Abbildung 8-14 ein Verhältnis von kleiner gleich 0,8 (1 geteilt durch 1,25) aufweisen. Dies sind 30 % der Gebäude, weshalb eine derartige Überdimensionierung eine Reduktion des Potenzials um 7 Prozentpunkte zur Folge hätte.
- **Gebäudedämmung:** Würden alle Wohngebäude gedämmt werden, deren Verhältnis in Abbildung 8-14 größer 1 und kleiner gleich 1,8 ist, sodass ihr Wärmeenergiebedarf nach der Dämmung kleiner gleich dem Wärmeenergieangebot für Solar/Eisspeicherwärmepumpen ist, dann würde sich das Potenzial auf 51 % erhöhen (abzulesen bei „ $\leq 1,8$ “). Dies würde einer Reduktion des Wärmeenergiebedarfs um maximal 44,4 % (0,8 geteilt durch 1,8) entsprechen.

Auf diese Weise können weitere Hypothesen aufgestellt werden und die resultierende Veränderung des Potenzials in Abbildung 8-14 abgelesen werden. Im Vergleich zur Sensitivität des Potenzials von Erdsondenwärmepumpen (vgl. Abbildung 7-21) ist die Steigung in Abbildung 8-14 deutlich größer. Demnach variiert das Potenzial Solar/Eisspeicherwärmepumpen in Abhängigkeit veränderter Parameter mehr.



## 8.4 Zwischenfazit

---

Die entwickelte Methodik ermöglicht die quantitative Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von Solar/Eisspeicherwärmepumpen anhand von Geo- und Statistikdaten. Hierzu wird auf Basis der Daten eines Solardachkatasters die Dachfläche sowie analog der Methodik des Erdwärme-Modells die mögliche Größe von Eisspeichern auf Basis der Grundstücksgeometrie untersucht. Im Resultat können 37 % der 17,1 Mio. analysierten Gebäude bzw. 28 % des Wärmeenergiebedarfs mit Solar/Eisspeicherwärmepumpen versorgt werden. Dabei zeichnet sich ein deutlicher Unterschied zwischen den analysierten Gebäudetypen ab. Der Großteil der geeigneten Gebäude sind Ein-/Zweifamilienhäuser, da diese am häufigsten über ausreichend nutzbare Grundstücksfläche im Vergleich zum Wärmeenergiebedarf verfügen. Unter einem spezifischen Wärmeenergiebedarf von 100 kWh/(m<sup>2</sup>·a) sind mehr als die Hälfte der analysierten Gebäude geeignet, da diese ein günstiges Verhältnis von Dachfläche und Grundstücksfläche zu Wärmeenergiebedarf aufweisen. Das Stadt-Land-Gefälle des Potenzials stellt sich ähnlich wie bei dem der Erdsondenwärmepumpe dar.

Hinsichtlich des Modells sind folgende Grenzen bzw. Möglichkeiten zur Weiterentwicklung feststellbar: Statt einer Abbildung der nutzbaren Dachfläche auf Basis von Statistik wäre wie in [163] der Einsatz von Methoden zur Bilderkennung zur automatisierten Identifikation von Dachaufbauten und bestehenden Photovoltaikanlagen möglich, wobei der Aufwand zur Datenverarbeitung hierdurch deutlich steigen würde. Auch bzgl. der Grundstücksgeometrie bestehen Möglichkeiten zur Weiterentwicklung (vgl. Kapitel 7.4). Darüber hinaus könnten im Modell klimatische Einflüsse auf die Entzugsarbeit des Solar-Luft-Kollektors sowie des Eisspeichers berücksichtigt werden. Dies könnte zu regionalen Veränderungen des Potenzials führen. Dabei können sich Einflüsse wie eine höhere Solarstrahlung und geringere Außentemperaturen z. B. in Süddeutschland auch gegenseitig aufheben.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass in den meisten Fällen nicht die Dachfläche, sondern die nutzbare Grundstücksfläche für Eisspeicher das Wärmeenergieangebot limitiert. Auf die Höhe des Potenzials haben etwaige Abweichungen in der Abbildung der Dachfläche somit nur geringe Auswirkungen. Um die Konkurrenz zu Photovoltaikanlagen zu reduzieren können Hybridkollektoren, sogenannte PVT-Kollektoren, eingesetzt werden. Wenngleich Solar/Eisspeicherwärmepumpen bisher kaum am Markt etabliert sind, weisen sie ein relevantes Potenzial auf und könnten zukünftig häufiger eingesetzt werden.

## 9 Gesamtpotenzial

Die Ergebnisse der Potenzialanalysen der untersuchten Wärmequellen sind in den Kapiteln 6.3.2, 7.3.2 und 8.3.2 umfassend dargestellt. Von den 17,1 Mio. analysierten Gebäuden können 65 % durch Luftwärme-, 47 % durch Erdsonden-, 24 % durch Erdkollektor- und 37 % durch Solar/Eisspeicherwärmepumpen mit Wärme versorgt werden. Da sich die Potenziale der einzelnen Wärmequellen überlagern, ist eine Addition dieser Anteile nicht möglich. In diesem Kapitel ist beschrieben, wie hoch das Gesamtpotenzial ist und wie sich dieses zusammensetzt. Das Gesamtpotenzial bezeichnet den Anteil der Gebäude, die für mindestens einer der analysierten Wärmequellen geeignet sind. Der je Gebäude durchgeführte Vergleich des Wärmeenergiebedarfs mit dem Maximum des Energieangebots der analysierten Wärmequellen ergibt folgendes Ergebnis:

75 % der 17,1 Mio. analysierten Gebäude sind für eine Wärmepumpe mit Luft, Erde oder Solar- kollektor & Eisspeicher als Wärmequelle geeignet.

Abbildung 9-1 fasst die Potenziale je Wärmequelle und das Gesamtpotenzial zusammen.

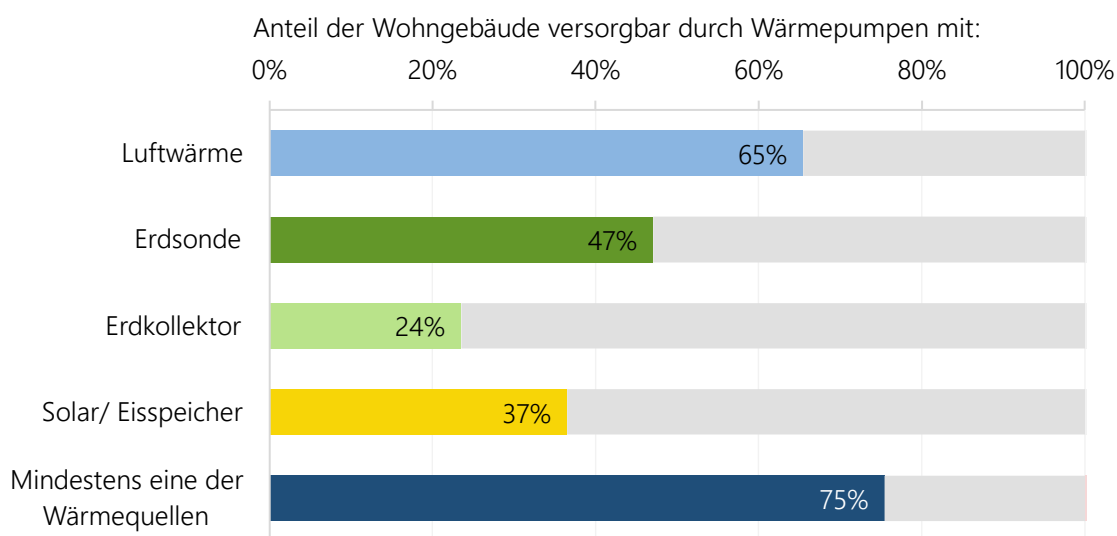


Abbildung 9-1: Potenzial je Wärmequelle und gesamt im Jahr 2022

Im Folgenden wird die Zusammensetzung des Gesamtpotenzials nach Wärmequellen, Gebäudetyp, Stadt- bzw. Gemeindetyp und spezifischem Wärmeenergiebedarf beschrieben und abschließend der mit allen Wärmequellen bereitstellbare Wärmeenergiebedarf dargestellt. Diese Auswertungen zeigen, wo aktuell dezentrale Wärmepumpen zum Einsatz kommen können. Kapitel 10 umfasst weiterführende Analysen zum zukünftigen Potenzial, der Abgrenzung zu Wärmenetzen sowie der möglichen Entwicklung des Wärmepumpenbestands.

### Zusammensetzung des Gesamtpotenzials nach Wärmequellen

Die 75 % der für Wärmepumpen geeigneten Wohngebäude können in die in Abbildung 9-2 dargestellten Klassen unterteilt werden. Diese Klassen überlappen sich nicht und ergeben addiert 75 %.

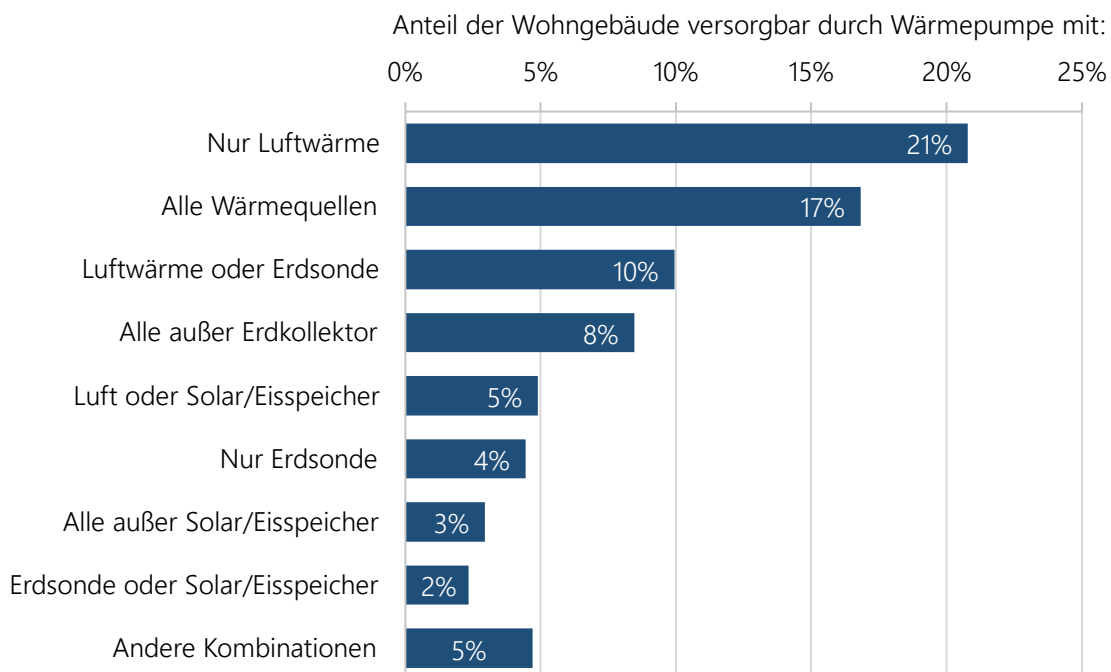


Abbildung 9-2: Zusammensetzung des Potenzials aller untersuchten Wärmequellen

Insgesamt gibt es für die vier verschiedenen Wärmequellen mit jeweils dafür geeigneten und ungeeigneten Gebäuden 16 verschiedene Kombinationen bzw. Klassen. Abzüglich der für Wärmepumpen komplett ungeeigneten Klasse sind die restlichen 15 Klassen in Abbildung 9-2 dargestellt, wobei die 7 Klassen mit Werten unter 2 % in der Klasse „Andere Kombinationen“ aggregiert sind. 21 % der Gebäude sind ausschließlich für Luftwärmepumpen geeignet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Luftwärmepumpen den geringsten Platzbedarf aufweisen. 17 % der Gebäude sind für alle Wärmequellen geeignet. Dass in diesen Fällen auch Erdkollektoren einsetzbar sind zeigt, dass sich diese Gebäude auf vergleichsweise großen Grundstücken befinden. Die Verteilung der weiteren Kombinationen ist das Ergebnis verschiedener Konstellationen wie der nutzbaren Grundstücksfläche (z. B. zu klein für Erdkollektoren) oder der Grundstücksgeometrie (z. B. zu schmal für Eisspeicher).

### Gesamtpotenzial je Gebäudetyp

Abbildung 9-3 zeigt das Gesamtpotenzial je Gebäudetyp. Mit 90 % ist der Großteil der Ein-/Zweifamilienhäuser für mindestens eine der Wärmequellen geeignet. Diese Klasse weist zudem die höchste Anzahl an Gebäuden auf. Freistehende Mehrfamilienhäuser mit bis zu sechs Wohneinheiten weisen mit 80 % ebenfalls eine hohe Eignung auf. In diesen Klassen ist das Verhältnis aus Wärmeenergiebedarf und verfügbarer Fläche bzw. Abstand zu Nachbarbebauung besonders günstig. Aufgrund der einseitig angrenzenden Bebauung fällt der Anteil der geeigneten Doppelhaushälften mit 69 % etwas geringer aus. Dementsprechend ist der Anteil für Reihenhäuser mit 42 % noch geringer, wobei Reihenhäuser häufiger geeignet sind. Bei Mehrfamilienhäusern mit mehr als sechs Wohneinheiten können nur 33 % mit mindestens einer der Wärmequellen mit Wärme versorgt werden. Am ungünstigsten zur Wärmeversorgung mittels Wärmepumpe erweisen sich gereihte große Mehrfamilienhäuser.

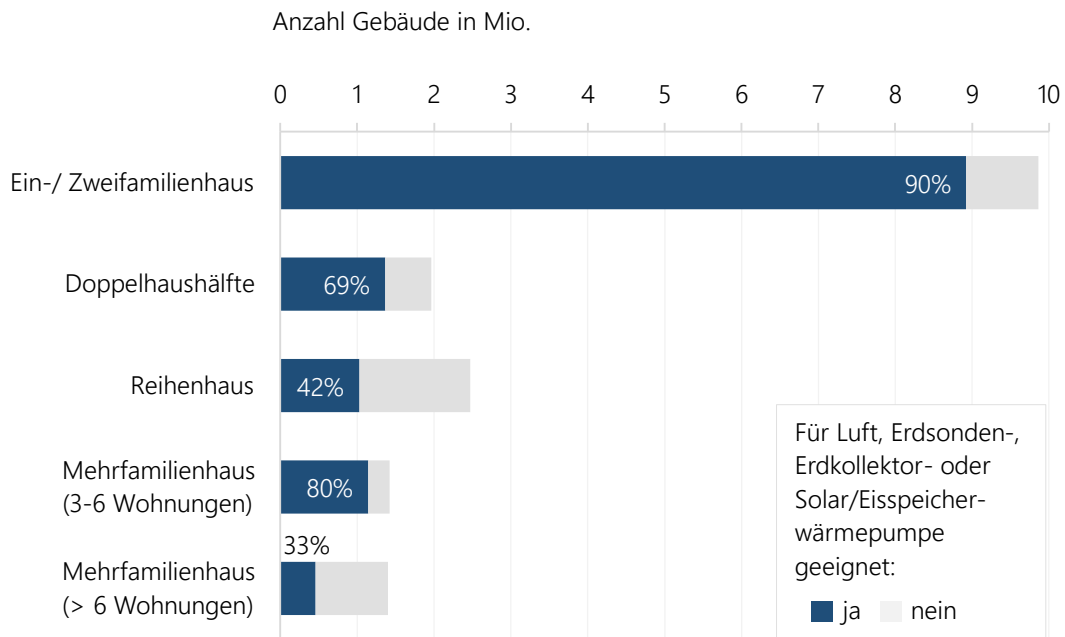


Abbildung 9-3: Potenzial aller untersuchten Wärmequellen (Luft, Erde oder Solar/Eisspeicher) je Gebäudetyp

### Gesamtpotenzial je Stadt- bzw. Gemeindetyp

Abbildung 9-4 zeigt die räumliche Verteilung des Gesamtpotenzials anhand der Aufteilung in Stadt- bzw. Gemeindetypen. Darüber hinaus ist das Gesamtpotenzial je Landkreis in Abbildung 14-6 (im Anhang) abgebildet.

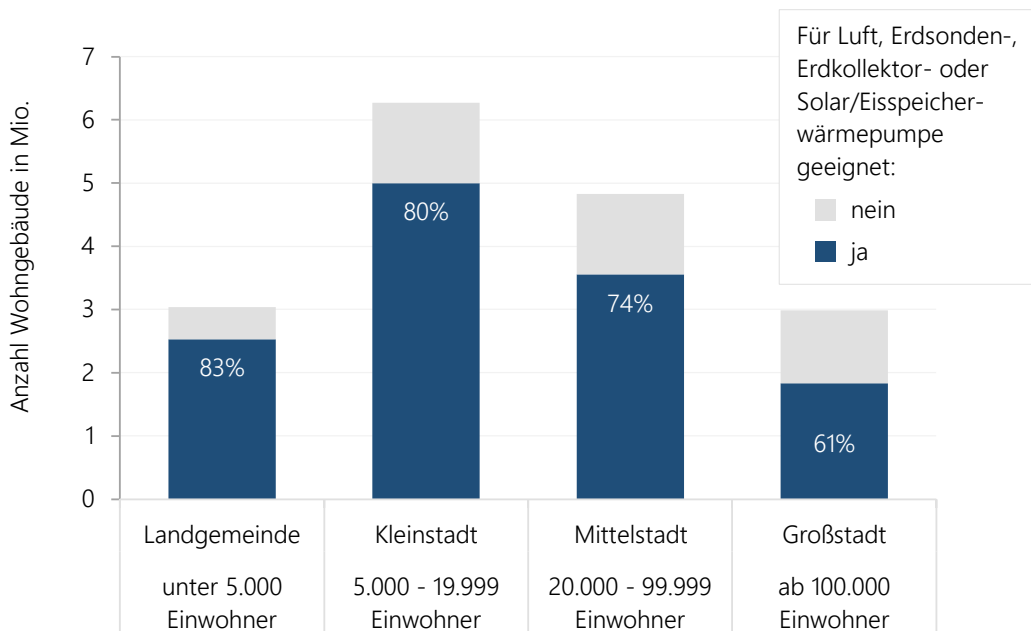


Abbildung 9-4: Potenzial aller untersuchten Wärmequellen (Luft, Erde oder Solar/Eisspeicher) je Stadt- bzw. Gemeindetyp

Der Anteil der für Wärmepumpen geeigneten Wohngebäude nimmt von Landgemeinden (83 %), über Kleinstädte (80 %) und Mittelstädte (74 %) hin zu Großstädten (61 %) ab. Dies ist maßgeblich auf die Verteilung der Gebäudetypen in diesen Kategorien zurückzuführen (vgl. Abbildung 9-3). Grundsätzlich lässt sich auch ein funktionaler Zusammenhang zwischen Siedlungs- bzw. Wärmebedarfsdichte und Potenzial herstellen (vgl. Abbildung 10-2). Dementsprechend nimmt das Potenzial

in (Groß-)städten von typischerweise weniger dicht besiedelten Randgebieten hin zu hoch verdichteten Kerngebieten deutlich ab.

### Gesamtpotenzial in Abhängigkeit des spezifischen Wärmeenergiebedarfs

Der spezifische Wärmeenergiebedarf von Bestandsgebäuden repräsentiert in erster Linie die energetische Qualität der Gebäudehülle und korreliert somit mit dem Baualter sowie dem Sanierungszustand (vgl. Kapitel 4.2.3). Abbildung 9-5 stellt das Gesamtpotenzial in Abhängigkeit des spezifischen Wärmeenergiebedarfs dar. Der Anteil der für Wärmepumpen geeigneten Gebäude ist für das Intervall 1 – 50 kWh/(m<sup>2</sup>·a) mit 93 % am größten, nimmt dann schrittweise bis zum Intervall 151 – 200 kWh/(m<sup>2</sup>·a) auf 73 % ab und steigt wieder bis auf 82 % im der Klasse 251 – 300 kWh/(m<sup>2</sup>·a) an. Demzufolge ist keine direkte Abhängigkeit von spezifischem Wärmeenergiebedarf und dem Potenzial feststellbar. Die weitere Analyse zeigt eine Überlagerung mehrerer Effekte. Den größten Einfluss hat der Gebäudetyp. Vor allem Einfamilienhäuser weisen Werte von über 200 kWh/(m<sup>2</sup>·a) auf (vgl. Abbildung 4-23) und sind zudem vielfach für Wärmepumpen geeignet (vgl. Abbildung 9-3). Der höhere Bedarf an Wärmeenergie wird dementsprechend in vielen Fällen durch ein höheres Angebot überkompensiert. Wärmepumpen können demnach auch vielfach in unsanierten oder teilsanierten Wohngebäuden zum Einsatz kommen. Maßnahmen wie der Austausch von kleineren Heizkörpern gegen größere ermöglichen auch in diesen Gebäuden einen effizienten Betrieb der Anlage (vgl. Kapitel 5).

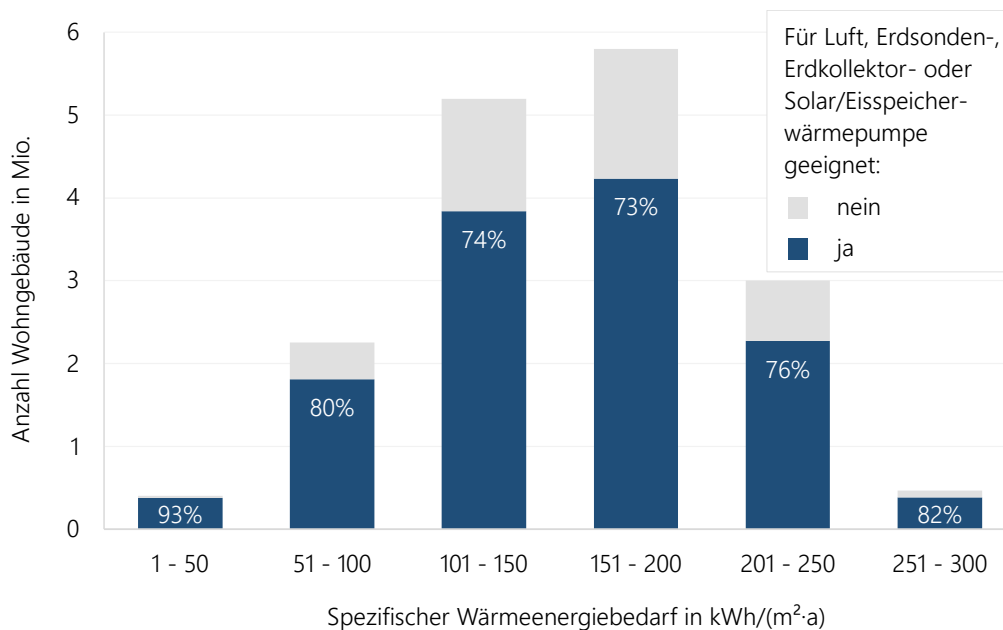


Abbildung 9-5: Potenzial aller untersuchten Wärmequellen (Luft, Erde oder Solar/Eisspeicher) in Abhängigkeit des spezifischen Wärmeenergiebedarfs

### Bereitstellbarer Wärmeenergiebedarf

Zur Einordnung der möglichen Rolle von Wärmepumpen ist neben dem Anteil der hierfür geeigneten Gebäude auch der bereitstellbare Wärmeenergiebedarf relevant. Aus Sicht des technischen Potenzials könnten im Jahr 2022 66 % des gesamten Wärmeenergiebedarfs mittels Wärmepumpen bereitgestellt werden. In Abbildung 9-6 ist dieser je Gebäudetyp differenziert dargestellt.

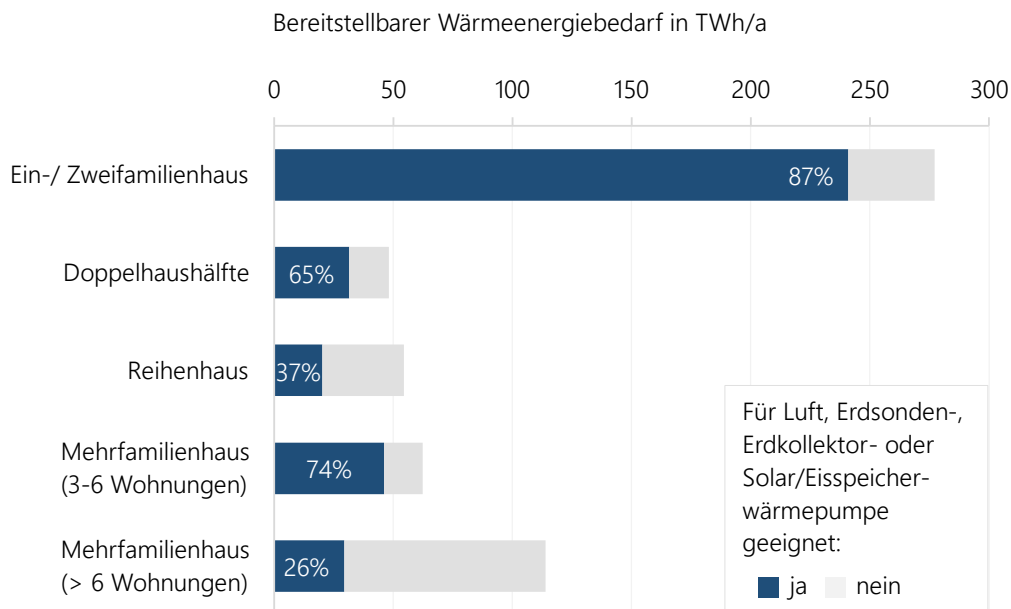


Abbildung 9-6: Bereitstellbarer Wärmeenergiebedarf aller untersuchten Wärmequellen (Luft, Erde oder Solar/Eisspeicher) je Gebäudetyp

Der relative Anteil des bereitstellbaren Wärmeenergiebedarfs je Gebäudetyp stellt sich ähnlich wie der relative Anteil der geeigneten Gebäude (vgl. Abbildung 9-3) dar. Lediglich die Höhe der Anteile fällt geringer aus, da Gebäude mit einem für die jeweilige Klasse unterdurchschnittlichen Wärmeenergiebedarf häufiger geeignet sind. Die größten Abweichungen sind in den Mehrfamilienhaus-Kategorien feststellbar. Dies lässt sich in erster Linie auf die höhere Bandbreite des Wärmeenergiebedarfs in diesen Klassen zurückführen (vgl. Abbildung 4-22). Speziell Gebäude mit überdurchschnittlich vielen Stockwerken weisen ein ungünstiges Verhältnis aus Wärmebedarf und verfügbarer Fläche bzw. Abstand zur Nachbarbebauung auf. Die Verteilung nach den Gebäudetypen schlägt sich auch in der Auswertung des bereitstellbaren Wärmeenergiebedarfs je Gemeinde- bzw. Stadtyp nieder: In Landgemeinden können 74 %, in Kleinstädten 72 %, in Mittelstädten 65 % und in Großstädten 49 % bereitgestellt werden.

Das nachfolgende Kapitel umfasst weiterführende Analysen zur Zusammensetzung des zukünftigen Potenzials, der möglichen Ergänzung durch die zentrale Wärmeversorgung sowie zur möglichen Entwicklung des Wärmepumpenbestands.

# 10 Entwicklung des Wärmepumpenbestands

Die aktuell von Gas- und Ölkesseln dominierte Wärmeversorgung könnte zukünftig maßgeblich von elektrischen Wärmepumpen geprägt sein. Kapitel 10 zeigt, wie die Ergebnisse der Potenzialanalyse in der Energiesystemanalyse Anwendung finden können. Hierbei werden verschiedene Szenarien zur Bestandsentwicklung von Wärmepumpen betrachtet und die Auswirkungen auf den zukünftigen Strombedarf sowie die CO<sub>2</sub>-Emissionen bewertet. Der Fokus dieser Untersuchungen liegt auf der Analyse des Einflusses der Wärmequellenzusammensetzung dezentraler Wärmepumpen. Bestehende Szenarien unterscheiden sich in dieser Hinsicht erheblich, wobei diese v. a. die Aufteilung zwischen Luft- und Erdwärmepumpen thematisieren und für Erdwärmepumpen Anteile von 7 bis 50 % ausweisen (vgl. [14] und [164]). Darüber hinaus wird der Einfluss der Sanierungsrate untersucht.

Im Folgenden werden zur Beschreibung der Entwicklung des Bestandes dezentraler Wärmepumpen das zukünftige Potenzial (Kapitel 10.1) ermittelt, der Zielpfad beschrieben und die Technologiezusammensetzung (Kapitel 10.2) analysiert. Darauf aufbauend werden der resultierende Strombedarf (Kapitel 10.3) und die Verminderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen untersucht (Kapitel 10.4). Die Erschließung der Wärmequellen bezieht sich jeweils auf die in dieser Arbeit untersuchten Technologien, weshalb die Begriffe Wärmequelle und Technologie im Folgenden synonym verwendet werden.

## 10.1 Zukünftiges Potenzial

---

Die Potenzialberechnung erfolgt durch Gegenüberstellung von Angebot und Bedarf an Wärmeenergie. Beide Größen können sich in den nächsten Jahrzehnten verändern. Zur Ermittlung des Potenzials dezentraler Wärmepumpen im Jahr 2045 werden folgende Annahmen getroffen:

- **Neubau:** Ab 2022 neu errichtete Gebäude werden nicht berücksichtigt, da diese aufgrund der hohen Anforderungen an die energetische Qualität keine große Relevanz für die Höhe der gesamten Treibhausgasemissionen aufweisen. Zudem sind hier keine relevanten Limitierungen für den Einsatz dezentraler Wärmepumpen zu erwarten (vgl. [17] und [15]). Nachverdichtung in bestehenden Siedlungsstrukturen wird aufgrund mangelnder Daten ebenfalls nicht einbezogen.
- **Dämmung:** Durch Maßnahmen zur Erhöhung der energetischen Qualität der Gebäudehülle reduziert sich der Wärmeenergiebedarf bestehender Wohngebäude fortlaufend. Hierbei werden zwei Szenarien untersucht. In Szenario A wird entsprechend dem Trend eine jährliche Sanierungsrate von 1,1 % (vgl. [59]) angesetzt, während in Szenario B durch Forcierung auf Dämmungsmaßnahmen eine Verdopplung dieser Rate (vgl. [165]) auf 2,2 %/a angenommen wird. Es wird davon ausgegangen, dass Vollsanierungen durchgeführt werden, da diese langfristig effektiver als Teilsanierungen sind (vgl. [59]). Da Maßnahmen zur Dämmung der Gebäudehülle wirtschaftlich am attraktivsten sind, wenn der Ausgangszustand eine geringe energetische Qualität aufweist (vgl. [166]) wird angenommen, dass diese in Wohngebäude mit einem spezifischen Wärmeenergiebedarf über 150 kWh/(m<sup>2</sup>·a) erfolgen. Dies trifft auf 9,1 Mio. Wohngebäude des modellierten Bestands zu (vgl. Abbildung 4-23). Rund die Hälfte dieser Gebäude (48 %) werden in Szenario A saniert. In Szenario B bleiben

hingegen nur 5 % dieser Gebäude unsaniert, was etwa dem Anteil der Gebäude mit Dämmrestriktionen (z. B. Denkmalschutz) entspricht (vgl. [167]). Abgesehen von dem festgelegten Schwellenwert des spezifischen Wärmeenergiebedarfs, wird die Auswahl der Gebäude, für die eine Sanierung angenommen wird, nach dem Zufallsprinzip durchgeführt. Um großräumige Verschiebungen auszuschließen, erfolgt dies je Postleitzahl. Nach [59] beträgt der spezifische Nutzenergiebedarf für Raumwärme energetisch sanierter Gebäude, unter Berücksichtigung des Rebound-Effekts, je nach Gebäudetyp und Baualter zwischen 47 und 70 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Der spezifische Wärmeenergiebedarf inklusive Trinkwarmwasserbedarf und Verteil- und Speicherverlusten beträgt rund 100 kWh/(m<sup>2</sup>·a) für Ein-/ Zweifamilien-, Doppel- und Reihenhäuser, 94 kWh/(m<sup>2</sup>·a) für Mehrfamilienhäuser bis sechs Wohneinheiten und 79 kWh/(m<sup>2</sup>·a) Mehrfamilienhäuser ab 7 Wohneinheiten (vgl. [59]). Der gesamte Wärmeenergiebedarf im Modell reduziert sich im Zeitraum von 2022 bis 2045 um 13 % (Szenario A) bzw. 28 % (Szenario B).

- Technologieentwicklung:** Durch stetige Weiterentwicklung ist eine Erhöhung der Effizienz von Wärmepumpen zu erwarten. Die Einschätzungen zur Höhe der möglichen Steigerung in den nächsten Jahrzehnten divergieren (vgl. [168], [110] und [169]). Für den Zeitraum 2020 bis 2045 wird in Anlehnung an [168] eine Erhöhung der Jahresarbeitszahl um 10 % für Luftwärmepumpen und für Sole-Wärmepumpen um 20 % in beiden Szenarien angenommen. Die Steigerung der Effizienz führt zu einem leichten Anstieg des Bedarfs an Umweltwärme (vgl. Abbildung 5-1) und entsprechend zu einer geringfügigen Abnahme des Potenzials. Wie in Kapitel 6.3.3 beschrieben, ist in den letzten Jahren eine Reduktion der Schallemissionen von Luftwärmepumpen zu verzeichnen. Aus diesem Grund wird für das Jahr 2045 die Variante mit geringen Schallemissionen (vgl. Abbildung 6-13) in Szenario A und B angesetzt.

Mit den entwickelten Modellen und unter Berücksichtigung der beschriebenen Annahmen wird das zukünftige Potenzial von Wärmepumpen zur dezentralen Wärmeversorgung von Wohngebäuden für Szenario A und B berechnet (vgl. Abbildung 10-1).

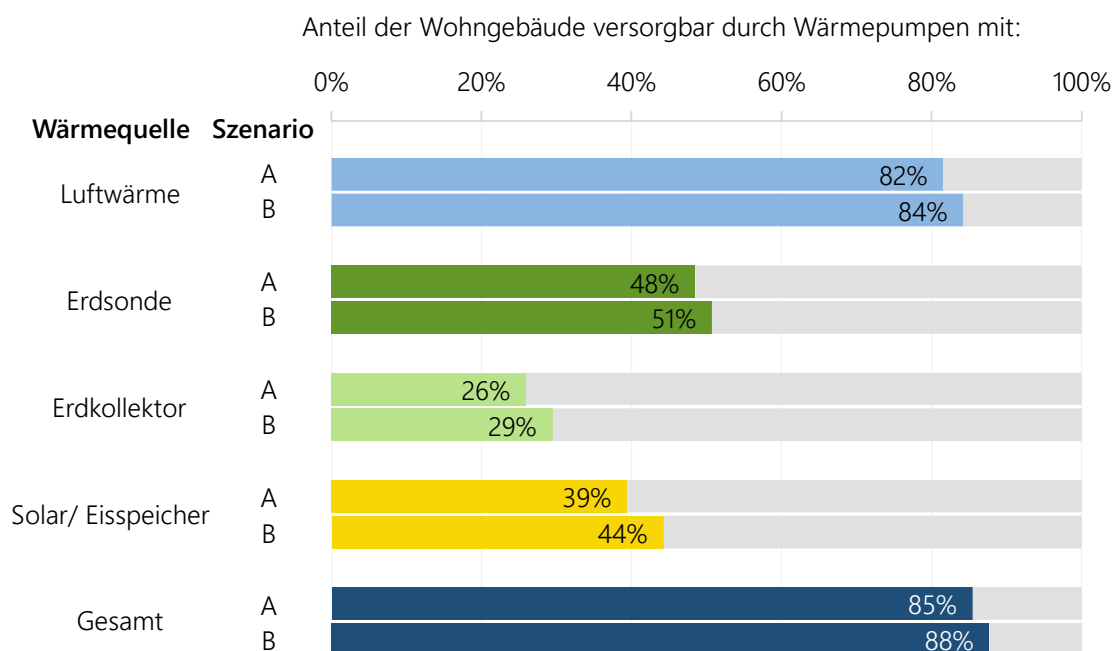


Abbildung 10-1: Potenzial je Wärmequelle und gesamt für Szenario A (Dämmung nach Trend) und Szenario B (Forcierte Dämmung) für das Jahr 2045



Abbildung 10-1 zeigt, dass das zukünftige Potenzial in beiden Szenarien gegenüber dem heutigen Potenzial zunimmt (vgl. Kapitel 9). Luftwärmepumpen verzeichnen mit 17 bzw. 19 Prozentpunkten mehr die größte Zunahme. Dies ist im Wesentlichen auf die angenommene Reduktion der Schallemissionen zurückzuführen. Die Zunahme beträgt für die weiteren Wärmequellen 1 bis 7 Prozentpunkte. Die Verdopplung der Sanierungsrate in Szenario B wirkt sich nur geringfügig auf die Höhe der Potenziale aus, was sich auch mit den Ergebnissen [17] deckt. Der Anteil von Gebäuden, welche mindestens mit einer Wärmequelle vollständig mit Wärme versorgt werden können, beträgt 85 % (Szenario A) bzw. 88 % (Szenario B).

### **Abgrenzung zu Wärmenetzen**

Vor den Analysen zur Bestandsentwicklung dezentraler Wärmepumpen bis zum Jahr 2045 (vgl. Kapitel 10.2) wird untersucht, in welchem Zusammenhang das zukünftige Potenzial von Wärmepumpen mit möglichen Wärmenetzgebieten steht. Wärmenetze sind am attraktivsten, wenn die benötigte Leitungslänge im Vergleich zur bereitgestellten Wärme gering ist. Die nachfolgend beschriebene Analyse der Wärmebedarfsdichte anhand von Rasterdaten stellt gegenüber der Bewertung mittels Wärmelinienindichte eine Vereinfachung dar, die aufgrund der Komplexität und der verfügbaren Datenbasis im Rahmen einer deutschlandweiten Auswertung als zielführend erachtet wird. Wärmenetze versorgen nicht ausschließlich private Haushalte, weshalb auch der Wärmebedarf der Bereiche Gewerbe, Handel und Dienstleistungen berücksichtigt wird. In [59] ist die Methodik erläutert, mit welcher anhand von Daten nach [170], [171], [172], [173], [174] und [175] ein Rasterdatensatz der Wärmebedarfsdichte in einer Auflösung von 100x100 m erstellt wurde und wie auf dieser Basis das Wärmenetzpotenzial abgeleitet werden kann. Aufgrund der langen Nutzungsdauer sowie des hohen Installationsaufwands in bestehenden Siedlungen werden Wärmenetze für einen langfristigen Betrieb geplant. Um auch zukünftig einen ausreichenden Wärmeabsatz zu gewährleisten, wird die Abnahme des Wärmeenergiebedarfs von Szenario B sowohl für private Haushalte als auch Gewerbe, Handel und Dienstleistungen angenommen. Durch räumliche Verschneidung der Rasterdaten mit den Wohngebäuden kann deren Anteil in Abhängigkeit der Wärmebedarfsdichte dargestellt werden (vgl. Abbildung 10-2). Auf der Abszisse ist die Wärmebedarfsdichte als Intervall oberhalb eines Schwellenwerts angegeben.

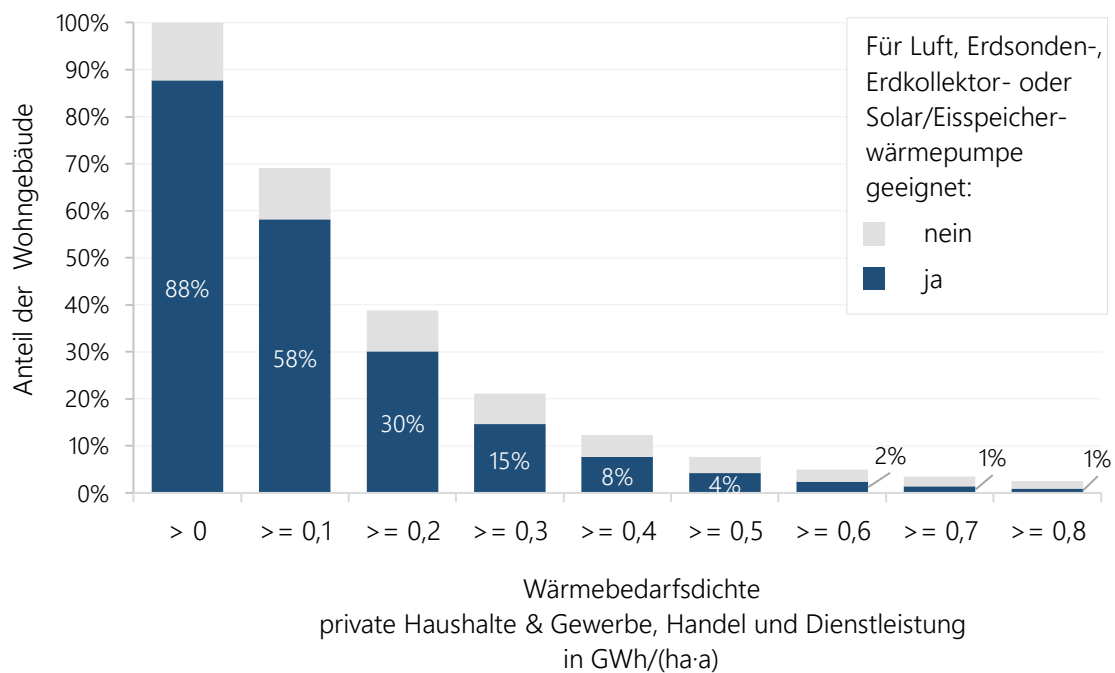


Abbildung 10-2: Anteil der Wohngebäude nach Eignung für dezentrale Wärmepumpen und Wärmebedarfsdichte für das Jahr 2045 in Szenario B

Wird für die Eignung von Wärmenetzen ein Schwellenwert von 0,4 GWh/(ha·a) nach [176] angesetzt, befinden sich rund 12 % der analysierten Gebäude in einem Potenzialgebiet für das Jahr 2045. 8 % wären zudem auch für Wärmepumpen geeignet. Für die weitere Analyse in Kapitel 10.2 bedeutet dies, dass 80 % der Wohngebäude für Wärmepumpen geeignet sind und außerhalb von für Wärmenetze geeigneten Gebieten liegen. Die 8 % der Wohngebäude, welche weder Potenzial für dezentrale Wärmepumpen noch für Wärmenetze aufweisen, könnten beispielsweise anhand von Biomasse mit Wärme versorgt werden. Wasserstoff eignet sich aufgrund der Effizienz, der benötigten Infrastruktur sowie dem erwarteten Preis nicht für den umfangreichen Einsatz in der dezentralen Wärmeversorgung (vgl. [60], [177] und [178]).

Durch die Variation des Schwellenwerts um  $\pm 0,1$  GWh/(ha·a) verändert sich das Potenzial zur Versorgung mittels Wärmenetzen um  $-4$  bzw.  $+9$  Prozentpunkte. Ändern sich Rahmenbedingungen, die für eine Anpassung des Schwellenwertes sprechen, so sind entsprechende Verschiebungen zwischen zentraler und dezentraler Wärmeversorgung möglich.

Die beschriebene Analyse liefert Indikatoren für das mögliche Zusammenwirken aus dezentraler und zentraler Wärmeversorgung. Mit den zugrundeliegenden Vereinfachungen stellt sie keine abschließende Bewertung der Potenziale von Wärmenetzen dar. Sowohl das Gebäude-Modell als auch die verwendeten Rasterdaten weisen gewisse Erfassungslücken auf. Darüber hinaus existieren weitere Einflüsse, die eine erhöhende oder reduzierende Wirkung auf die Höhe des Wärmenetz-Potenzials haben können. Einerseits könnte der Wärmebedarf durch Faktoren wie Nachverdichtung von Gebäuden und Denkmalschutz in diesen Gebieten weniger stark zurückgehen als angenommen. Andererseits wird keine Einschränkung bezüglich des minimalen Wärmeabsatzes in zusammenhängenden Gebieten wie in [176] festgesetzt.

## 10.2 Zielfad und Technologiezusammensetzung

Aufbauend auf dem zukünftigen Potenzial außerhalb möglicher Wärmenetzgebiete (vgl. Kapitel 10.1) wird in diesem Kapitel die Bestandsentwicklung dezentraler Wärmepumpen bis zum Jahr 2045 analysiert. Zu diesem Zweck wird der Zielfad aktueller Energiesystemstudien herangezogen und es werden mögliche Varianten zur Technologiezusammensetzung erörtert. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird untersucht, welche Auswirkungen dies auf den zukünftigen Strombedarf (vgl. Kapitel 10.3) sowie die Verminderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen hat (vgl. Kapitel 10.4).

### Zielfad

Grundlage für die Modellierung der Bestandsentwicklung sind die Zielfade einschlägiger Studien (vgl. Abbildung 10-3).

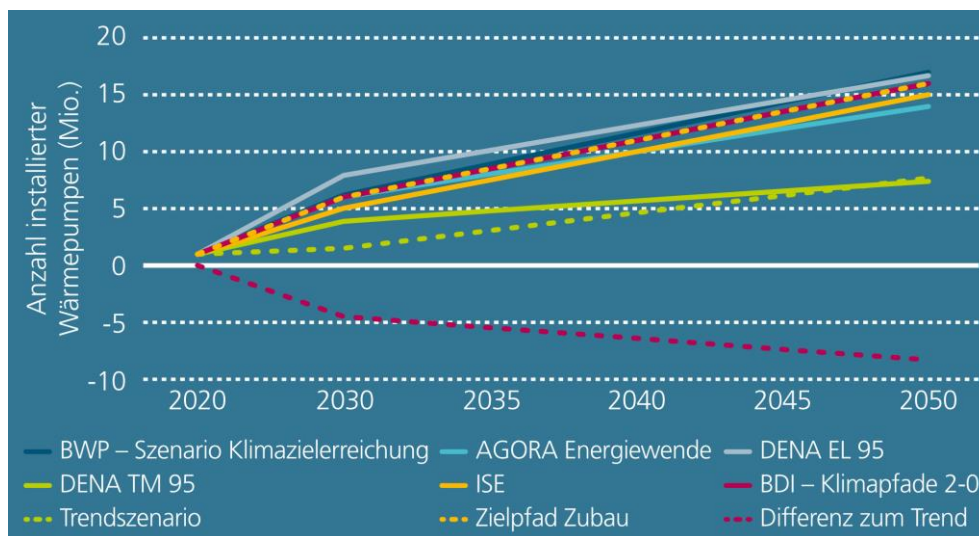


Abbildung 10-3: Szenarien zur Bestandsentwicklung von Wärmepumpen bis zum Jahr 2050 nach [14] auf Basis von [11], [7], [8], [164] und [6]

Die in Abbildung 10-3 abgebildeten Szenarien beziehen sich auf den gesamten Gebäudebestand inklusive Nichtwohngebäude und weisen mit Ausnahme von [8] eine Zielzahl von 14 bis 17 Mio. und im Mittel 16 Mio. Wärmepumpen bzw. Gebäude mit Wärmepumpen auf (vgl. [14]).

Die folgende Analyse zur Bestandsentwicklung von Wärmepumpen basiert auf der in dieser Arbeit durchgeführten Potenzialanalyse bestehender Wohngebäude. Da hierdurch Nichtwohngebäude und zusätzlich errichtete Wohngebäude nicht berücksichtigt werden, wird eine im Vergleich zu den genannten Studien leicht abweichende Zielzahl von 15 Mio. Wärmepumpen angenommen. Dies entspricht einer oberen Abschätzung. Entsprechend dem in Kapitel 10.1 ermittelten Potenzial außerhalb von Wärmenetz-Potenzialgebieten ist die Realisierung dieses Anteils bezogen auf die 19,3 Mio. Bestandsgebäude möglich. Dabei wird angenommen, dass die Ergebnisse der Potenzialanalyse aufgrund der vergleichbaren Gebäudetyp-Zusammensetzung (vgl. Kapitel 4.3) auf den gesamten Wohngebäudebestand anwendbar sind.

Der Zeithorizont der Ziele zur Emissionsreduktion hat sich im Vergleich zu dem in Abbildung 10-3 dargestellten geändert (vgl. [179]), weshalb der Betrachtungszeitraum von 2020 bis 2045 gewählt wird. Der Zubau von Wärmepumpen in dieser Größenordnung ist sehr ambitioniert und nur mit einer enormen Steigerung der Produktions- und Handwerkerkapazitäten realisierbar (vgl. [5]). Die Analyse erfolgt unter der Annahme, dass sich diese Kapazitäten zeitnah dem hohen Bedarf anpassen. Um zu untersuchen, zu welchem Anteil die analysierten Wärmequellen hierfür herangezogen werden

können und welche Auswirkungen dies auf den zukünftigen Strombedarf sowie die CO<sub>2</sub>-Emissionen hat, wird vereinfachend eine lineare Zunahme bis zum Zielwert angenommen. Der Ausgangszustand für die Jahre 2020 und 2021 wird auf Basis des kumulierten Anlagenzubaus nach [180] abgebildet.

### **Technologiezusammensetzung des zukünftigen Wärmepumpenbestands**

Im Folgenden werden auf Basis des ermittelten Potenzials je Wärmequelle verschiedene Technologiezusammensetzungen analysiert. Um Unterschiede deutlich herauszustellen, werden Varianten beschrieben, welche die Grenzen der möglichen Zusammensetzung aufzeigen. Hierzu wird für jede Variante eine Reihenfolge definiert, nach der die Wärmequellen ausgewählt werden. Je Gebäude wird die Wärmequelle ausgewählt, welche nach der Potenzialanalyse in Frage kommt und zudem die höchste Priorität entsprechend der festgelegten Reihenfolge aufweist. Die relative Zusammensetzung des Potenzials nach Wärmequellen ist in Szenario A und B annähernd identisch (vgl. Abbildung 10-1), weshalb bzgl. der Technologiezusammensetzung keine Unterscheidung erfolgt.

Die folgenden drei Varianten werden analysiert, wobei neben zwei Maximalausprägungen (Variante 1 und 3) auch eine mittlere Variante untersucht wird (Variante 2):

#### **Variante 1) Investition**

Luftwärmepumpen weisen im Vergleich zu den weiteren Wärmequellen i. d. R. die geringsten Investitionen auf, weshalb diesen in Variante 1 die höchste Priorität zugeteilt wird. Die Reihenfolge wird mit Erdkollektor- und dann Erdsondenwärmepumpen entsprechend der Höhe der Investition (vgl. [60]) fortgeführt. Im Vergleich zu Luft- und Erdwärmepumpen weisen Solar-/Eisspeicherwärmepumpen die höchsten Investitionen auf (vgl. [181]) und werden in Variante 1 deshalb nachrangig erschlossen.

#### **Variante 2) Mix**

Variante 2 stellt einen Mittelweg zwischen Variante 1 und 3 dar. Demnach werden 50 % der Gebäude nach Technologiereihenfolge von Variante 1 und 50 % nach Reihenfolge von Variante 3 zugeordnet. Für eine gleichmäßige räumliche Verteilung erfolgt die Zuordnung der Technologiereihenfolge auf die Gebäude je Postleitzahl und nach dem Zufallsprinzip.

#### **Variante 3) Effizienz/ Betriebskosten**

Als Gegenpart zur Erschließung nach Investition (Variante 1) wird in Variante 3 die Potenzialerschließung nach Betriebskosten bzw. Effizienz unterstellt. Erdkollektor- und Erdsondenwärmepumpen weisen eine ähnliche Jahresarbeitszahl auf, weshalb Anlagen mit Erdkollektor zugunsten der Investition die höchste Priorität zugewiesen wird (vgl. [60]). Entsprechend der Höhe der Jahresarbeitszahl folgen Solar-/Eisspeicherwärmepumpen und Luftwärmepumpen (vgl. Kapitel 5).

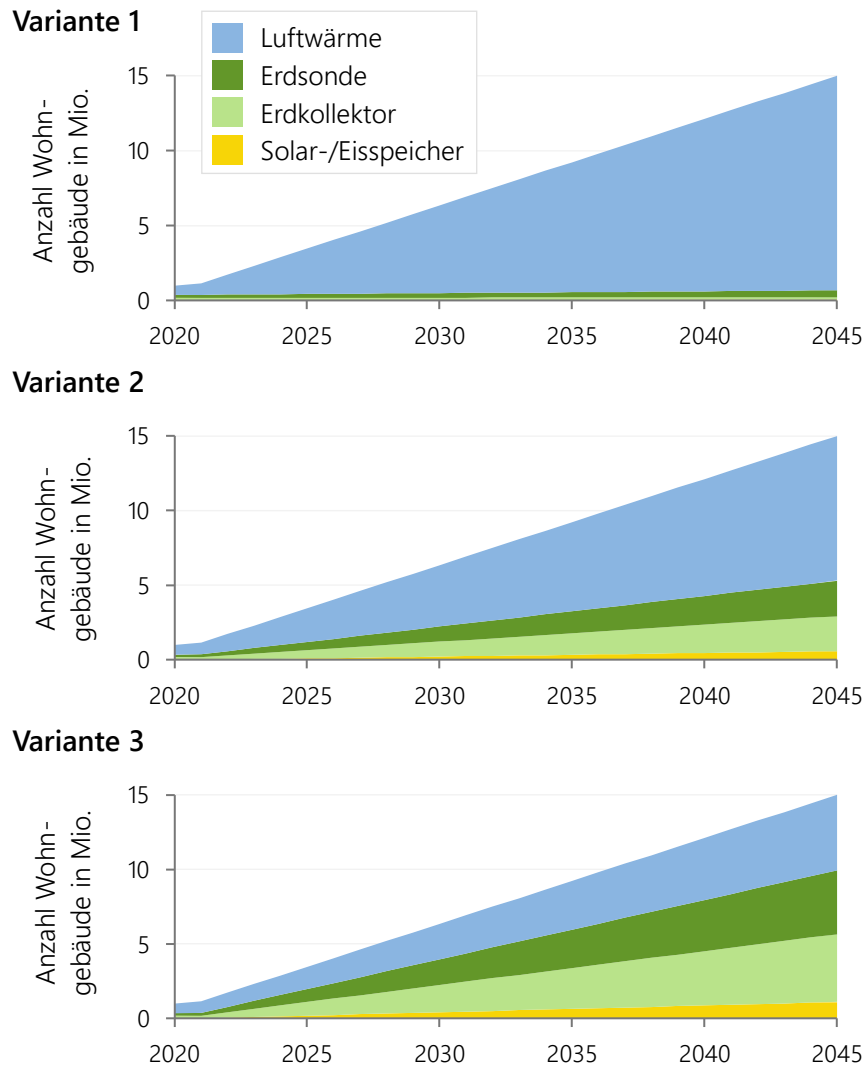


Abbildung 10-4: Varianten zur Bestandsentwicklung dezentraler Wärmepumpen nach Wärmequelle

Der Anteil von Luftwärmepumpen am Absatzmarkt ist in den letzten Jahren stetig gestiegen und lag im Jahr 2021 bei 82 % (Trinkwarmwasserwärmepumpen ausgenommen) [180]. Entsprechend der definierten Priorisierung werden in Variante 1 fast ausschließlich Luftwärmepumpen zugebaut, weshalb diese im Jahr 2045 in 95 % der Gebäude mit Wärmepumpe installiert sind. Für Erdwärmepumpen bedeutet diese Reihenfolge lediglich eine Verdopplung des aktuellen Bestands. In Variante 2 stellen Luftwärmepumpen 64 %, Erdkollektor- und Erdsondenwärmepumpen jeweils 16 % und Solar-/Eisspeicherwärmepumpen 4 % des Bestands im Jahr 2045 dar. In Variante 3 werden Luftwärme- (34 %), Erdsonde- (29 %) und Erdkollektorwärmepumpen (30 %) im Jahr 2045 in vergleichbarem Umfang eingesetzt. Mit 7 % machen Solar-/Eisspeicherwärmepumpen wie in allen betrachteten Varianten den geringsten Anteil aus, was auf die Priorisierung nach Investition bzw. Effizienz zurückzuführen ist. Dies könnten auch Gründe für den derzeit marginalen Marktanteil dieser Technologie sein.

Anhand der beschriebenen Varianten werden nachfolgend die Auswirkungen auf den Strombedarf sowie die Verminderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen untersucht.

## 10.3 Resultierender Strombedarf

Die untersuchten Wärmequellen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Effizienz, weshalb in diesem Kapitel untersucht wird, welchen Einfluss die Technologiezusammensetzung und die angesetzte Sanierungsrate auf den zukünftigen Strombedarf von Wärmepumpen zur dezentralen Wärmeversorgung von Wohngebäuden haben können.

Anhand der Anzahl der Gebäude (vgl. Abbildung 10-4), dem Wärmeenergiebedarf und der Jahresarbeitszahl (vgl. Kapitel 5) wird der Strombedarf von Wärmepumpen je Sanierungsszenario und Wärmequellen-Variante berechnet (vgl. Abbildung 10-5).

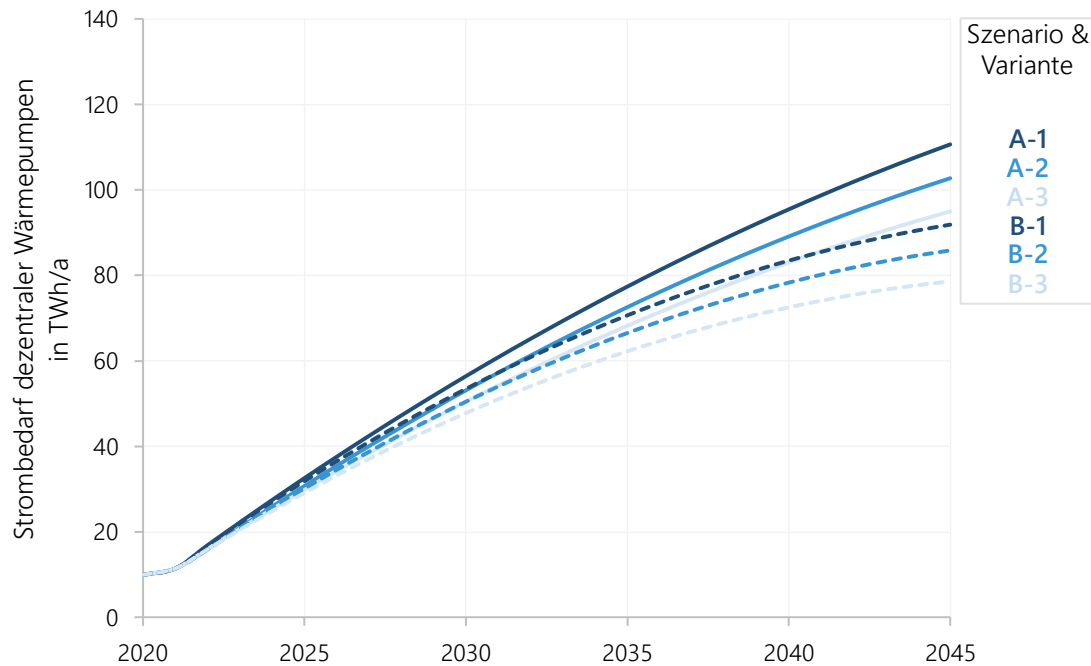


Abbildung 10-5: Strombedarf dezentraler Wärmepumpen nach Dämmungsszenario und Technologievariante

In Szenario A (Sanierungsrate nach Trend) liegt der Strombedarf dezentraler Wärmepumpen je nach Technologiezusammensetzung bei 111 TWh (Variante 1), 103 TWh (Variante 2) bzw. 95 TWh (Variante 3) für das Jahr 2045. Durch die Verdopplung der Sanierungsrate kann dieser auf 92, 86 bzw. 79 TWh/a für die Varianten 1 bis 3 gesenkt werden. Aufgrund des zunehmenden Anteils sanierter Gebäude sowie der Steigerung der Jahresarbeitszahl nimmt die Steigung der Kurven in Abbildung 10-5 kontinuierlich ab.

Die Differenz zwischen Minimum und Maximum beträgt 32 TWh im Jahr 2045. Der Einfluss auf den gesamten im Jahr 2045 erwarteten Strombedarf in Höhe von 710 bis 1.040 TWh/a (vgl. [182]) ist eher gering. Vor dem Hintergrund einer vollständigen Dekarbonisierung des Energiesystems muss jeder zusätzliche Bedarf an elektrischer Energie durch den Zubau erneuerbarer Stromerzeugungsanlagen kompensiert werden. Ein Mehrbedarf von 32 TWh/a entspricht der Stromerzeugung von etwa 2.325 Windkraftanlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von jeweils 5,5 Megawatt (vgl. [183]).

## 10.4 Verminderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen

Zur Einordnung der Ergebnisse aus Kapitel 10.2 und 10.3 im Kontext der Dekarbonisierung des Energiesystems wird nachfolgend der Einfluss der Szenarien auf die Verminderung energiebedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen analysiert. Auf der einen Seite werden durch den Austausch der bisher überwiegend mit fossilen Energieträgern betriebenen Heizsysteme CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden, auf der anderen Seite werden durch den Strombezug der Wärmepumpen in geringerem Umfang CO<sub>2</sub>-Emissionen freigesetzt.

Es wird angenommen, dass keine Heizsysteme mit Fernwärme oder Biomasse gegen Wärmepumpen ausgetauscht werden. Für die verdrängten Anlagen wird unter Berücksichtigung der Technologiezusammensetzung (u. a. differenziert nach Niedertemperatur- und Brennwerttechnik) und Anlagenutzungsgraden nach [59] ein mittlerer CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor berechnet. Bei diesen Anlagen handelt es sich fast ausschließlich um Öl- und Gaskessel und in geringem Umfang um direktelektrische Heizsysteme, welche zum Teil um Solarthermieanlagen oder Holzeinzelraumöfen ergänzt sind. Für die Emissionsfaktoren der Energieträger wird das Klimaschutzszenario (Technologiemix) nach [62] herangezogen (vgl. Abbildung 3-1). Die verwendeten Werte für das Jahr 2025 und 2030 (300 bzw. 200 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>elektrisch</sub>) entsprechen annähernd den Werten des Trendszenarios nach [184] und entsprechen demnach einer oberen Abschätzung. Für den Zeitraum ab 2030 hingegen sinken die Werte nach [62] deutlicher ab. Die Werte von [62] wurden ausgewählt, da die zugrunde liegende Anzahl und Effizienz von Wärmepumpen nahezu übereinstimmen. Die Emissionsfaktoren entsprechen Jahresmittelwerten nach der Strommixmethode (vgl. [185]), welche mit einem umfangreichen Energiesystemmodell, ohne Berücksichtigung der Vorketten der Energieträger ermittelt wurden. Um dem geänderten Zeithorizont der Klimaschutzziele zu entsprechen, wird der Wert für 2050 auf das Jahr 2045 übertragen und die Werte der weiteren Stützjahre anteilig reduziert, was einer Stauchung der Kurve in Abbildung 3-1 entspricht. Die Verwendung synthetischer Brennstoffe in der Industrie und dem Verkehr wurde in [62] berücksichtigt, eine Anwendung in privaten Haushalten wurde als nicht zielführend erachtet. Deshalb werden für Öl und Gas konstante Emissionsfaktoren (Heizöl leicht bzw. Erdgas) nach [186] verwendet. Für Biomasse werden keine energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen berechnet, da das bei der Verbrennung emittierte CO<sub>2</sub> wieder im Anbau gebunden wird (vgl. [62]). Der Austausch bestehender Heizsysteme erfolgt ohne Priorisierung, weshalb eine konstante Technologiezusammensetzung unterstellt wird. Im Ergebnis weist der verdrängte Technologiemix einen auf den Wärmeenergiebedarf bezogenen Emissionsfaktor von 231 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>thermisch</sub> (2020) auf. Lediglich der Emissionsfaktor für den Strombezug direktelektrischer Heizsysteme verändert sich, weshalb der Emissionsfaktor der verdrängten Heizsysteme geringfügig auf 216 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>thermisch</sub> im Jahr 2045 sinkt. Im Mittel entspricht dies dem Emissionsfaktor von Gasniedertemperaturkesseln, einem der am weitesten verbreiteten Heizsysteme in Deutschland (vgl. [59]). Die Reduktion des Strombedarfs von Wärmepumpen durch den Weiterbetrieb bestehender Solarthermieanlagen oder Holzeinzelraumheizungen wird vernachlässigt, da davon ausgegangen wird, dass der Aufwand für Einbindung, Betrieb, Wartung und Instandsetzung dieser Anlagen den Mehrwert übersteigt. Darüber hinaus bleiben zur Komplexitätsreduktion weitere Maßnahmen wie der Zubau von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung oder Gebäudeautomatisierung außen vor.

Zur Visualisierung der Unterschiede zwischen den Szenarien, ist in Abbildung 10-6 die Ab- und Zunahme der CO<sub>2</sub>-Emissionen separat dargestellt. Die effektive Emissionsreduktion ergibt sich durch Verrechnung der beiden Größen und ist aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht explizit ausgewiesen. Die Menge an vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Austausch bestehender Heizsysteme ist um ein Vielfaches höher als die durch den zusätzlichen Strombedarf verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen (vgl. Abbildung 10-6 oben). Aus diesem Grund wird der Wertebereich von 0 bis 11 Mio. t/a mit einer

skalierten Ordinate im Detail visualisiert (vgl. Abbildung 10-6 unten). Die im folgenden angegebenen Werte beziehen sich auf die analysierten 15 Mio. Bestandswohngebäude.

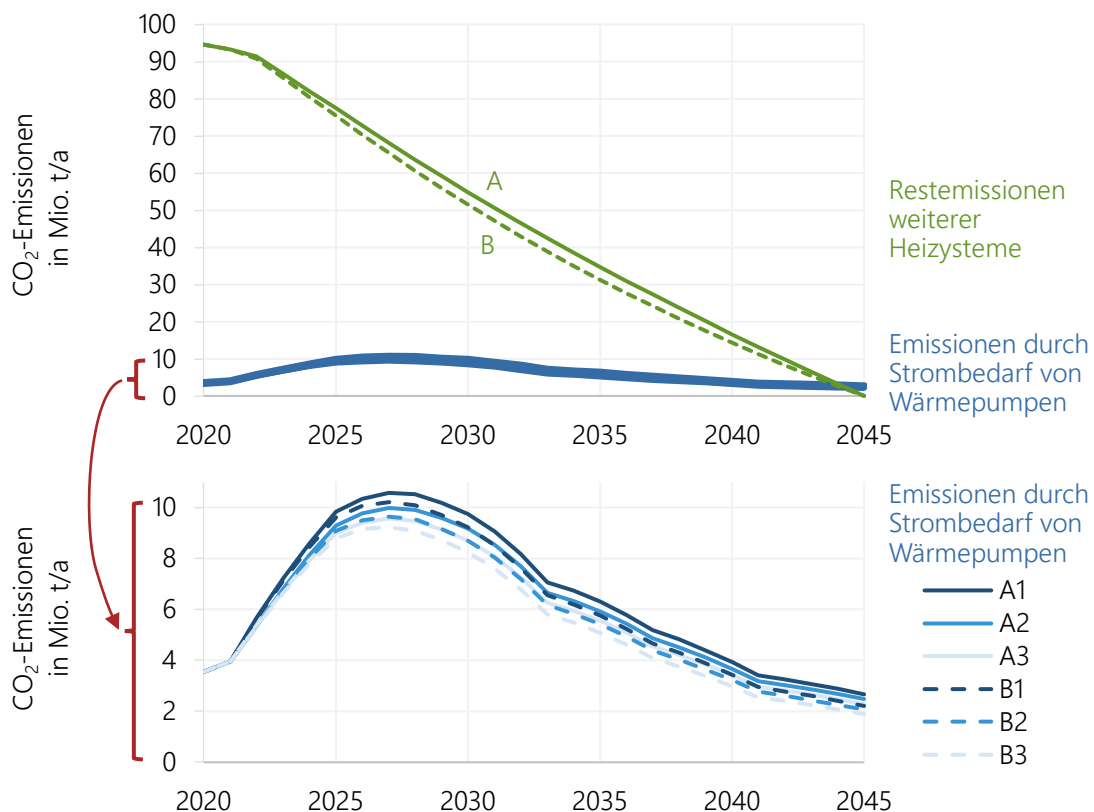


Abbildung 10-6: Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Austausch bestehender Heizsysteme und CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Strombedarf von Wärmepumpen

Die Anzahl an Wohngebäuden, die mit Wärmepumpen versorgt werden, nehmen über den analysierten Zeitraum zu (vgl. Abbildung 10-4), wodurch die Anzahl an anderen Heizsystemen abnimmt. Im Jahr 2045 können durch die Abnahme der überwiegend mit Heizöl und Erdgas betriebenen Heizsysteme 95 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> weniger als im Jahr 2020 verursacht werden. Die Wohngebäude werden unabhängig von dem Einsatz von Wärmepumpen energetisch saniert, weshalb sich die Menge an Restemissionen zwischen Szenario A und B (vgl. Abbildung 10-6 oben) unterscheidet. Demgegenüber stehen Emissionen durch den Strombedarf von Wärmepumpen, die in Abbildung 10-6 unten nach Sanierungsrate (A: 1,1 %/a bzw. B: 2,2 %/a) und Technologiezusammensetzung (1: Investition, 2: Mix, 3: Effizienz) differenziert sind. Während der Strombedarf in allen Fällen kontinuierlich zunimmt (vgl. Abbildung 10-5), steigen die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen erst an, erreichen im Jahr 2027 ihren Höhepunkt und nehmen dann wieder ab. Dies ist auf den ab diesen Zeitpunkt deutlich sinkenden Emissionsfaktor von Strom zurückzuführen (vgl. Abbildung 3-1). Die Differenz der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Stromverbrauchs von Wärmepumpen fällt zwischen den untersuchten Varianten gering aus. Er beträgt zwischen den Varianten A1 und B3 maximal 1,5 Mio. Tonnen im Jahr 2030 und 0,8 Mio. Tonnen im Jahr 2045.

Durch die Verrechnung der vermiedenen und der zusätzlichen Emissionen ergibt sich die effektive Abnahme an CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Wärmepumpen. Diese beträgt im Jahr 2045 je nach Variante 95 bis 96 Mio. Tonnen. Dies entspricht einer Reduktion um 97 bis 98 % gegenüber dem Jahr 2020. Kumuliert über den Betrachtungszeitraum werden in Variante A1 rund 82 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> mehr emittiert als in Variante B3.



Maßnahmen in [66] sollen die Geschwindigkeit zum Ausbau von Photovoltaik- und Windkraftanlagen vorantreiben. Dies könnte zu einer schnelleren Reduktion des Emissionsfaktors für Strom als in [62] führen. Dies würde sowohl die Höhe der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den zusätzlichen Strombedarf von Wärmepumpen als auch den Unterschied zwischen den untersuchten Szenarien bzw. Varianten reduzieren. Für eine vollständige Dekarbonisierung muss der Emissionsfaktor für Strom, abgesehen von einer Kompensation oder Abscheidung bzw. Einlagerung von CO<sub>2</sub>, letztlich 0 g CO<sub>2</sub>/kWh betragen.

## 10.5 Zwischenfazit

Kapitel 10 zeigt wie die in dieser Arbeit entwickelten Modelle (vgl. Kapitel 4 bis 8) in der Energiesystemanalyse eingesetzt werden können. Untersucht wurde die Entwicklung des Wärmepumpenbestands bis zum Jahr 2045 im Hinblick auf die Zusammensetzung nach Wärmequellen und deren Auswirkungen auf den Strombedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Zu diesem Zweck wurde für Wärmepumpen das zukünftige Potenzial ermittelt, ein Zielpfad beschrieben und Varianten zur Technologiezusammensetzung definiert. Zur Bestimmung des technischen Potenzials von Wärmepumpen für das Jahr 2045 wurden Annahmen zur Sanierungsrate und zur Technologieentwicklung getroffen. In Szenario A wurde die Dämmung nach Trend (1,1 %/a) und in Szenario B eine Verdopplung dieser Sanierungsrate unterstellt. Zudem wurde eine Zunahme der Jahresarbeitszahl sowie eine Reduktion der Schallemissionen von Luftwärmepumpen angenommen. Im Resultat steigt das Gesamtpotenzial auf 85 bis 88 %, bzw. um 10 bis 13 Prozentpunkte gegenüber dem Jahr 2022 an. Für Luftwärmepumpen sind demnach 82 bis 84 % der Wohngebäude, für Erdsondenwärmepumpen 48 bis 51 %, für Erdkollektorzpumpen 26 bis 29 % und für Solar-/Eisspeicherwärmepumpen 39 bis 44 % geeignet. Weiter wurde analysiert, inwiefern sich das Potenzial in Gebieten befindet, die langfristig auch für eine Versorgung mittels Wärmenetz geeignet sind. Für 8 % der Wohngebäude wurde weder eine Eignung für Wärmepumpen noch für Wärmenetze festgestellt. Dies belegt, dass sich die untersuchten, dezentralen Wärmepumpen und die zentrale Wärmeversorgung zum Zweck einer vollständigen Dekarbonisierung ergänzen können und nur ein geringer Anteil der Wohngebäude ein alternatives Heizsystem benötigt. Diese Lücke könnte durch Wärmepumpen mit Wärmequellen wie Grundwasser, die Kombination mehrerer Wärmequellen oder mit Heizsystemen auf Basis von Biomasse geschlossen werden. Hybride Wärmepumpen, die mit fossilen Heizkesseln ergänzt werden, sollten aufgrund der langen Nutzungsdauer und den damit verbundenen zusätzlichen Emissionen nicht zur Musterlösung werden (vgl. [182] und [4]). Aus der Sicht des technischen Potenzials ist die von aktuellen Studien geforderte Anzahl an Wärmepumpen realisierbar, wobei für die Bestandsgebäude 15 Mio. als Zielzahl angewendet wurde. Nach [187] sollen neu installierte Heizsysteme mindestens einen Anteil von 65 % an erneuerbaren Energien aufweisen. Dies kommt einem Verbot von mit fossilen Brennstoffen betriebenen Heizungsanlagen gleich und würde Wärmepumpen und grüne Wärmenetze erheblich fördern. Vor dem Hintergrund dieser Maßnahme erscheint der in dieser Arbeit beschriebene Zielpfad realistischer als unter den derzeitigen Rahmenbedingungen. Dabei liegt die Austauschrate auf Basis der Nutzungsdauer (vgl. [59]) etwas unter der Transformationsgeschwindigkeit des analysierten Zielpfads. Ob die Höhe der Investitionsförderung ausreicht, um einen Anreiz für den Austausch von Heizsystemen auch vor dem Ende der Lebensdauer zu setzen, ist aufgrund der aktuell angespannten geopolitischen Situation mit volatilen Preisen aller Energieträger schwer zu beurteilen. Um die Bandbreite möglicher Zusammensetzungen der Wärmequellen aufzuzeigen, wurden drei Varianten dargestellt. In Variante 1 wurde die Erschließung der Wärmequellen nach Höhe der Investition angenommen, weshalb überwiegend Luftwärmepumpen realisiert werden. Demgegenüber wurde in Variante 3 nach Effizienz bzw. Betriebskosten

priorisiert, wodurch 59 % der Wärmepumpen im Jahr 2045 Erdwärme, 7 % Energie aus Solarthermieanlagen und Eisspeichern und 34 % aus Luftwärme nutzen. Variante 2 stellt einen Mittelweg aus Variante 1 und 3 mit rund Zweidrittel Luftwärme und einem Drittel Erdwärme dar. Die Unterschiede der Varianten zeigen den Raum an Möglichkeiten für die Entwicklung des Wärmepumpenbestands auf. Die Aufteilung zwischen Luft- und Erdwärme spiegelt dabei die Abwägung von Investition und Betriebskosten bzw. Effizienz wider. Für Gebäudeeigentümer:innen können weitere Kriterien wie die Umsetzungsdauer oder die Akzeptanz (Optik, Eingriff in bestehende Gärten) u. v. m. die Auswahl der Wärmequelle beeinflussen. Für die Kombinationen aus Sanierungsszenario und Technologievariante wurde der Strombedarf sowie die CO<sub>2</sub>-Emissionen berechnet. Je höher die Sanierungsrate und der Anteil an Erdwärmepumpen, desto geringer ist der Strombedarf, wobei die maximale Differenz 32 TWh (zwischen A1 und B3) im Jahr 2045 beträgt. Der Beitrag zum gesamten zukünftig erwarteten Strombedarf ist jeweils gering, was verdeutlicht, dass elektrische Wärmepumpen unabhängig von der Wärmequelle effiziente Heizsysteme sind und die Energie zum überwiegenden Teil aus der Umwelt beziehen. Darüber hinaus wurden die Auswirkungen auf die Höhe der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen untersucht. Während der Strombedarf für Wärmepumpen im Zeitraum bis 2045 kontinuierlich zunimmt, steigen die dadurch jährlich verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2028 an und nehmen dann, aufgrund des Emissionsfaktors, wieder ab. Die untersuchten Szenarien unterscheiden sich hierbei maximal um 1,5 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> im Jahr 2030 bzw. um 0,8 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> im Jahr 2045. Der geringe Unterschied zusätzlicher Emissionen zwischen Szenario A und B zeigt, dass der Einsatz von Wärmepumpen auch in unsanierten Gebäuden zur deutlichen Treibhausgasverminderung führt. Bis zum Jahr 2045 können durch den Ersatz bestehender Heizsysteme (meist Öl- und Gaskessel) mit Wärmepumpen in 15 Mio. Wohngebäuden effektiv 97 bis 98 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber 2020 vermindert werden. Neben den energiebedingten Emissionen können Wärmepumpen auch durch die Leckage von Kältemittel zum Treibhauseffekt beitragen, wobei die F-Gas-Verordnung (vgl. [98]) die Umstellung auf Kältemittel mit geringerem Treibhauspotenzial vorgibt und Hersteller deshalb vermehrt Anlagen mit alternativen Kältemitteln wie Propan anbieten.

## 11 Fazit und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Quantifizierung des technischen Potenzials von Wärmepumpen zur dezentralen Wärmeversorgung der Wohngebäude in Deutschland. Anhand einer Voranalyse konnten relevante Wärmequellen für den flächendeckenden Einsatz von Wärmepumpen in Wohngebäuden identifiziert werden. Zur Quantifizierung des Anteils der Wohngebäude, deren Bedarf an Raumwärme und Trinkwarmwasser mittels Wärmepumpen versorgt werden kann, wurde ein Gebäude-, ein Anlagen-, ein Luftwärme-, ein Erdwärme- und ein Solar-/Eisspeicher-Modell entwickelt. Diese Modelle bilden den Bedarf und das Angebot an Wärmeenergie anhand von Geo- und Statistikdaten bundesweit je Wohngebäude ab. Durch Gegenüberstellung der beiden Größen wurde je Gebäude und Wärmequelle bestimmt, ob der Wärmebedarf vollständig bereitgestellt werden kann. Ausgehend davon wurde das technische Potenzial als Anteil der für Wärmepumpen geeigneten Gebäude berechnet. Das Gebäude-Modell basiert auf Daten zu Grundfläche, Höhe, Baualter und dem spezifischen Wärmeenergiebedarf und kombiniert somit geometrische Daten mit statistischen Kennwerten. Zur Abbildung der Heterogenität des Gebäudebestands erfolgte eine Kalibrierung unter Berücksichtigung klimatischer Verhältnisse und Abweichungen von dem mittleren Sanierungszustand bzw. Nutzerverhalten. Die Validierung der Ergebnisse des Gebäude-Modells mithilfe von Daten zu 19,3 Millionen Wohngebäuden in Deutschland zeigt, dass die Zusammensetzung der 17,1 Millionen abgebildeten Gebäude und deren Wärmebedarf plausibel ist. Aufgrund der ähnlichen Verteilung der Gebäudetypen lassen sich die Ergebnisse in erster Näherung auf den gesamten Wohngebäudebestand übertragen. Da die Effizienz von Wärmepumpen den Bedarf an Umweltwärme und damit das Potenzial beeinflusst, wurde diese in dem Anlagen-Modell abgebildet. Die Heizlast wurde ausgehend von dem Wärmebedarf mittels typischer Volllaststunden abgeleitet, da diese ebenfalls für die Quantifizierung des Potenzials benötigt wurde. In dem Luftwärme-Modell wurde die installierbare Leistung von Wärmepumpen, die unter Einhaltung der Schallschutzanforderungen realisierbar ist, bestimmt. Dabei wurden je Gebäude auf Basis von Geodaten potenzielle Anlagenstandorte definiert und unter Berücksichtigung von Abschirmung, Reflexion und Beugung von Schall der limitierende Abstand zur Nachbarbebauung ermittelt. Mit Hilfe einer Regressionsanalyse der Schallemissionen, der Formel zur Schallausbreitung und unter Berücksichtigung eines Schallimmissionsrichtwerts wurde ein funktionaler Zusammenhang von Abstand und thermischer Leistung von Luftwärmepumpen hergestellt. Auf diese Weise konnte für jedes der analysierten Wohngebäude das Angebot an Luftwärme quantifiziert werden. Anhand des Erdwärme-Modells wurden die Einsatzmöglichkeiten von Erdsonden und verschiedener Varianten von Erdkollektoren analysiert. Hierzu wurden je Gebäude die Grundstücksfläche und die einzuhaltenden Abstände zu Gebäuden, Grundstücksgrenzen sowie zwischen Erdsonden geometrisch modelliert. Auf Basis einer statistischen Auswertung wurden Flächennutzungen wie bestehende Bäume berücksichtigt, die in Konkurrenz zur Erschließung von Erdwärme stehen. Die Entzugsarbeit wurde in Abhängigkeit der Bodenart und Klimazone bzw. der Bohrtiefe modelliert. Als Einschränkung dieses Potenzials wurde mit einbezogen, ob Gebiete dem Wasserschutz unterliegen oder Vorkommen von Gips und Anhydrid aufweisen. Als weitere Variante wurde die Kombination aus Solar-Luft-Kollektoren und Eisspeichern untersucht. Mit dem Solar-/Eisspeicher-Modell konnten die Möglichkeiten zur unterirdischen Errichtung von Eisspeichern im Außenbereich analysiert werden. Die verfügbare Dachfläche für Solar-Luft-Kollektoren wurde auf Basis der Daten eines Solardachkatasters ermittelt. Neben den Potenzialen der einzelnen Wärmequellen wurden deren Überlagerung und das Gesamtpotenzial von

Wärmepumpen ausgewertet. Der Potenzialanalyse nachgelagert wurden als Anwendung der entwickelten Modelle die mögliche Entwicklung des Wärmepumpenbestands, deren Strombedarf und potenzieller Beitrag zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2045 analysiert.

Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse lassen sich zu folgenden fünf Kernaussagen zusammenfassen:

1. *Für drei Viertel der Wohngebäude in Deutschland ist das Angebot an Umweltwärme ausreichend hoch, um diese mit Wärmepumpen dezentral mit Wärme zu versorgen. In ländlichen Gemeinden und Kleinstädten ist der Anteil der geeigneten Gebäude höher, in Mittel- und Großstädten niedriger.*

Gegenwärtig können 75 % der Wohngebäude mit mindestens einer der analysierten Wärmequellen in Kombination mit Wärmepumpen versorgt werden. Insgesamt können auf diese Weise 66 % des derzeitigen Wärmebedarfs in Wohngebäuden bereitgestellt werden. Dabei sind 65 % der untersuchten Gebäude für Luftwärme-, 47 % für Erdsonden-, 24 % für Erdkollektor- und 37 % für Solar-/Eispeicherwärmepumpen geeignet. Die räumliche Verteilung der Potenziale zeigt, dass mit zunehmender Siedlungsdichte der Anteil geeigneter Gebäude abnimmt. In Landgemeinden können 83 %, in Kleinstädten 80 %, in Mittelstädten 74 % und in Großstädten 61 % der Wohngebäude dezentral mit Wärmepumpen versorgt werden. Neben der Siedlungsdichte sorgt auch das Klima für regionale Unterschiede. In Gebieten, die von maritimem Klima geprägt sind, ist der Wärmeenergiebedarf geringer und die Effizienz speziell von Luftwärmepumpen höher, wodurch das Potenzial höher ausfällt. In Gebieten mit geringeren Außenlufttemperaturen, wie in hoch gelegenen Gebieten, ist deren Potenzial geringer.

2. *Der Großteil der Einfamilienhäuser, Zweifamilienhäuser, kleinen Mehrfamilienhäuser und Doppelhaushälften kann mit Wärmepumpen versorgt werden, Reihenhäuser sind weniger häufig geeignet. Bei großen Mehrfamilienhäusern übersteigt der Wärmeenergiebedarf oft das Angebot der analysierten Wärmequellen.*

Für Einfamilienhäuser ist das Verhältnis von Wärmeenergiebedarf zu Grundstücksfläche, Dachfläche bzw. Abstand zur Nachbarbebauung meist besonders günstig für den Einsatz von Wärmepumpen. Deshalb ist für 90 % der Einfamilienhäuser das Angebot an Umweltenergie ausreichend für die Wärmeversorgung mittels Wärmepumpen. Auch freistehende Mehrfamilienhäuser mit bis zu sechs Wohneinheiten weisen mit 80 % eine hohe Eignung auf. Limitiert durch die einseitig angrenzende Bebauung fällt der Anteil der für Wärmepumpen geeigneten Doppelhaushälften mit 69 % etwas geringer aus. Dementsprechend ist der Anteil für Reihenhäuser mit 42 % noch geringer, wobei Reihenhäuser häufiger geeignet sind. Bei Mehrfamilienhäusern mit mehr als sechs Wohneinheiten ist hingegen nur jedes Dritte geeignet. Besonders ungünstig zur Versorgung mittels lokaler Umweltwärme und Wärmepumpe erweisen sich gereifte große Mehrfamilienhäuser.

3. *In vielen Fällen können Wärmepumpen auch in teil- oder unsanierten Bestandsgebäuden eingesetzt werden. Geringinvestive Maßnahmen wie der Austausch von Heizkörpern ermöglichen auch in diesen Gebäuden einen effizienten Betrieb der Anlage.*

Das Angebot an Umweltwärme ist auch in Wohngebäuden mit einem hohem spezifischem Wärmeenergiebedarf oft ausreichend hoch, um eine Wärmepumpe umzusetzen. Vor allem freistehende Gebäude wie Einfamilienhäuser im unsanierten Zustand haben vielfach einen hohen spezifischen Wärmeenergiebedarf, dem aufgrund der typischerweise geringen Siedlungsdichte oft ein hohes Angebot an lokal verfügbarer Umweltwärme gegenübersteht. Maßnahmen an der Wärmeverteilung und -übergabe ermöglichen auch in diesen Gebäuden einen effizienten Betrieb der Anlage. So kann die maximale Vorlauftemperatur des Heizkreises beispielsweise durch den Einbau von Heizkörpern mit größerer Fläche zur Wärmeübertragung auf 55 °C gesenkt werden. Unter dieser Voraussetzung

weisen Luftwärmepumpen eine mittlere Jahresarbeitszahl in Höhe von 3,0 und Erdwärmepumpen von 3,7 auf. Aus systemischer Sicht ist zu berücksichtigen, dass die Rate zum Austausch von Heizsystemen höher als die zur Umsetzung von Dämmungsmaßnahmen ist. Wenn die Dämmung eines Gebäudes kurz- bis mittelfristig nicht in Frage kommt, z. B. aus finanziellen Gründen, sollte der Einbau einer Wärmepumpe nicht an die Dämmung der Gebäudehülle geknüpft werden. Um die Umsetzungsgeschwindigkeit zur Erreichung der Klimaziele zu erhöhen, sollten Wärmepumpen auch in teil- und unsanierten Bestandsgebäuden zum Einsatz kommen. Langfristig entstehen die geringsten Emissionen, wenn auch in diesen Fällen die energetische Qualität der Gebäudehülle durch Sanierung in den nächsten Jahrzehnten erhöht wird.

4. *Auch langfristig stellt die Höhe des technischen Potenzials von Wärmepumpen zur dezentralen Wärmeversorgung von Wohngebäuden keine Limitierung für die Umsetzung der Energiewende dar. Verdichtete Gebiete können mithilfe von Wärmenetzen mit erneuerbaren Energien versorgt werden.*

Während derzeit 75 % der Wohngebäude mit mindestens einer der analysierten Wärmequellen in Kombination mit Wärmepumpen versorgt werden können, nimmt dieser Anteil perspektivisch zu. Im Jahr 2045 liegt dieser im Bereich von 85 bis 88 %, wobei die Zunahme maßgeblich auf geringere Schallemissionen von Luftwärmepumpen und einen sinkenden Wärmebedarf aufgrund von Dämmung zurückzuführen ist. Bei der Ermittlung des Gesamtpotenzials spielen Luftwärmepumpen eine zentrale Rolle. Wird das Potenzial von Luftwärmepumpen nicht genutzt, kann bis zum Jahr 2045 nur rund die Hälfte der Wohngebäude durch den Einsatz von Erdwärme- und Solar-/Eisspeicherwärmepumpen versorgt werden. In hochverdichteten Gebieten wie im Zentrum von Großstädten reicht das lokale Angebot an Umweltwärme oftmals nicht aus, um Wärmepumpen dezentral einzusetzen. Anhand von Wärmenetzen können auch in diesen Fällen erneuerbare Energien zur Wärmeversorgung eingesetzt werden. Lediglich 8 % der untersuchten Wohngebäude waren weder für eine Wärmepumpe in Kombination mit den analysierten Wärmequellen noch für die Versorgung mittels Wärmenetz geeignet. In diesen Fällen könnten weitere Wärmequellen wie Grundwasser oder Heizsysteme auf Basis von Biomasse zur Anwendung kommen. Wasserstoff, der aus erneuerbaren Energien hergestellt wird, könnte in Einzelfällen eingesetzt werden, eignet sich aufgrund der Effizienz, der nötigen Infrastruktur sowie dem erwarteten Preis hingegen nicht für den umfangreichen Einsatz in der Wärmeversorgung. Die Kombination aus Wärmepumpe und mit fossilem Brennstoff betriebenen Heizsystem ist aufgrund der langen Nutzungsdauer ebenso keine Musterlösung für die vollständige Dekarbonisierung der Wärmeversorgung von Gebäuden. Für die Umstellung auf Wärmepumpen als Standardheizsystem stellt die Höhe des technischen Potenzials keine Limitierung in den analysierten Szenarien dar. Ob Wärmepumpen bis zum Jahr 2045 im Großteil der Wohngebäude eingesetzt werden, hängt demnach maßgeblich von der Wirtschaftlichkeit bzw. den zugrundeliegenden regulatorischen Rahmenbedingungen sowie der Geschwindigkeit im Aufbau von Fachkräften und Produktionskapazitäten ab.

5. *Aufgrund der Überschneidung der Potenziale kann die Technologiezusammensetzung des zukünftigen Bestandes an Wärmepumpen deutlich variieren. Der resultierende Strombedarf trägt unabhängig von den eingesetzten Wärmequellen nur in geringem Maß zu dem gesamten zukünftigen Strombedarf bei.*

Die analysierten Wärmequellen können perspektivisch unterschiedliche Rollen einnehmen. Um den Raum an Möglichkeiten aufzuzeigen, wurden zwei extreme Varianten untersucht. Einerseits wurden die Technologien nach der Höhe der Investition aufsteigend priorisiert. In diesem Fall nutzen im Jahr 2045 95 % des Wärmepumpenbestands Luftwärme und lediglich 4 % Erdwärme bzw. 1 % Energie aus Solarthermieanlagen in Kombination mit Eisspeichern. Andererseits erfolgte die Priorisierung anhand der Betriebskosten bzw. der Effizienz der Technologien. Im Ergebnis sind zukünftig 59 %

Erdwärme-, 34 % Luftwärme- und 7 % Solar-/Eisspeicherwärmepumpen. Darüber hinaus wurde ein Mittelweg der genannten Varianten betrachtet. In diesem nutzen 64 % der Gebäude mit Wärmepumpe im Jahr 2045 Luftwärme, 32 % Erdwärme, und 4 % Wärme aus Solarthermieanlagen mit Eisspeicher. Luftwärmepumpen spielen mit 34 % bis 95 % in allen Varianten eine relevante Rolle. Des Weiteren wurde der Einfluss der Technologiezusammensetzung auf den Strombedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen quantifiziert. Der Strombedarf von Wärmepumpen in bestehenden Wohngebäuden im Jahr 2045 variiert zwischen 79 und 111 TWh. Die Differenz von 32 TWh/a ist im Vergleich zum zukünftig erwarteten gesamten Strombedarf von bis zu 1.040 TWh/a wenig relevant. Dieses Ergebnis unterstreicht, dass alle analysierten Technologievarianten den Großteil der Energie direkt aus der Umwelt und nur einen untergeordneten Teil in Form von Strom beziehen. Durch den Einsatz von Wärmepumpen in 15 Millionen Bestandsgebäuden nehmen die CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Beheizung dieser bis zum Jahr 2045 zwischen 97 bis 98 % gegenüber dem Jahr 2020 ab.

### **Ausblick**

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass die automatisierte Quantifizierung des technischen Potenzials mittels Geoinformationssystemen möglich ist. Die entwickelten Methoden bzw. Modelle können zukünftig um verschiedene Aspekte erweitert werden. So könnten bisher nicht berücksichtigte Wärmequellen wie das Grundwasser analysiert werden, um herauszufinden, welchen Einfluss diese auf das Gesamtpotenzial dezentraler Wärmepumpen und im Speziellen für große Mehrfamilienhäuser haben. Für Einflussfaktoren, für die keine deutschlandweiten Datensätze verfügbar sind, könnten z. B. Daten einzelner Bundesländer herangezogen werden, um die lokale Verortung der Potenziale weiter zu optimieren. Dies trifft v. a. auf die Grundstücksfläche, die Bohrtiefe und die Wärmeleitfähigkeit und demnach in erster Linie für Erdsondenwärmepumpen zu.

Neben den analysierten technischen Einflussfaktoren können lokale Voraussetzungen im Gebäude eine Umrüstung auf Wärmepumpen finanziell unattraktiv darstellen. Als solche sind v. a. in Mehrfamilienhäusern die bestehende Wärmeverteilung (Etagenheizungen, uneinheitliche Heizkreise o. ä.) sowie die Quellenerschließung (bspw. Platzbedarf für die Luftzufuhr) zu nennen. Eine quantitative Bewertung der Auswirkungen auf die wirtschaftliche Umsetzbarkeit des technischen Potenzials sollte neben der möglichen Veränderung von Investitions- und Betriebskosten alle technischen Lösungen, wie beispielsweise dachmontierte Luftwärmepumpen, berücksichtigen.

Die Ausnutzung des technischen Potenzials setzt auch die Akzeptanz der Technologien voraus, da die Erschließung und zum Teil auch die Nutzung der Wärmequellen wahrnehmbar sind. Vor diesem Hintergrund könnten sozialwissenschaftliche Studien durchgeführt werden, um die Bereitschaft zur Nutzung von Erd- oder Luftwärme mittels Wärmepumpen zu quantifizieren.

Weitere Anwendungsfälle der ermittelten Potenziale bestehen in der Energiesystemanalyse, wie die Analyse der elektrischen Maximallast in Abhängigkeit der Technologiezusammensetzung des zunehmenden Wärmepumpenbestands, sowie der räumlichen Zuordnung von Dekarbonisierungsmaßnahmen in der kommunalen Wärmeplanung.

## 12 Literatur

- [1] Rasch, Manuel et al.: Eine anwendungsorientierte Emissionsbilanz - Kosteneffiziente und sektorenübergreifende Dekarbonisierung des Energiesystems in: BWK 3/2017, Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2017.
- [2] Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2016.
- [3] Sofortprogramm gemäß § 8 Abs. 1 KSG für den Sektor Gebäude. Ausgefertigt am 13.7.2022, Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2022.
- [4] Bürger, Veit; Braungardt, Sibylle; Miara, Marek: Durchbruch für die Wärmepumpe – Praxisoptionen für eine effiziente Wärmewende im Gebäudebestand. Berlin: Agora Energiewende, 2022.
- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz; Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Breites Bündnis will mindestens 500.000 neue Wärmepumpen pro Jahr [Pressemeldung vom 29.06.2022]. 2022.
- [6] Boston Consulting Group: Klimapfade 2.0 - Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Berlin: Bundesverband der Deutschen Industrie, 2021.
- [7] Prognos; Öko-Institut; Wuppertal-Institut: Klimaneutrales Deutschland 2045 - Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann (Langfassung). Berlin: Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende, 2021.
- [8] Hecking, Harald et al.: Gebäudestudie - Szenarien für eine marktwirtschaftliche Klima- und Ressourcenschutzpolitik 2050 im Gebäudesektor. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2017.
- [9] Heizen ohne Öl und Gas bis 2035. Hamburg: Greenpeace e. V., 2022.
- [10] Strechele, Philip et al.: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, 2020.
- [11] Branchenstudie 2021: Marktanalyse – Szenarien – Handlungsempfehlungen. Berlin: Bundesverband Wärmepumpe e. V., 2021.
- [12] Gebäude und Wohnungen - Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden Lange Reihen ab 1969 - 2020. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2021.
- [13] Hörner, Michael et al.: Schlussbericht Forschungsdatenbank NichtWohnGebäude - Repräsentative Primärdatenerhebung zur statistisch validen Erfassung und Auswertung der Struktur und der energetischen Qualität des Nichtwohngebäudebestands in Deutschland. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2022.

- [14] Born, Holger et al.: Roadmap oberflächennahe Geothermie - Erdwärmepumpen für die Energiewende – Potenziale, Hemmnisse und Handlungsempfehlungen. Bochum: Fraunhofer Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie, 2022. DOI: <https://doi.org/10.24406/publica-70>.
- [15] Bracke, Rolf et al.: Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW Teil 4 - Geothermie - LANUV-Fachbericht 40. Recklinghausen: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2015.
- [16] Frisch, Jérôme et al.: GeTIS - Geothermisches Informationssystem zur Bemessung, Modellierung, Bewertung und Genehmigung vernetzter geothermischer Energiesysteme auf Gebäude- und Stadtquartiersebene. Aachen: Rheinisch-Westfälischen Technische Hochschule Aachen, 2020.
- [17] Ganal, Irina et al.: Entwicklung der Gebäudewärme und Rückkopplung mit dem Energiesystem in -95 % THG-Klimazielszenarien - Teilbericht. Kassel: Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik, 2019.
- [18] Jochum, Patrick et al.: Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich. Berlin: Beuth Hochschule für Technik, 2017.
- [19] Richter, Stephan et al.: Digitaler Wärmeatlas für 17,4 Millionen Wohngebäude in Deutschland. In: EuroHeat&Power 1-2/2014. Berlin: EW Medien und Kongresse GmbH, 2014.
- [20] Jochum, Patrick; Mellwig, Peter et al.: Dämmbarkeit des deutschen Gebäudebestands in: [www.ifeu.de](http://www.ifeu.de). Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, 2015.
- [21] Jochum, Patrick; et.al.: Technische Restriktionen bei der energetischen Modernisierung von Bestandsgebäuden. Berlin: Beuth Hochschule für Technik, 2012
- [22] Geothermie in Nordrhein-Westfalen erkunden · bewerten · nutzen. Krefeld: Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen - Landesbetrieb, 2011.
- [23] Thermische Nutzung des Untergrunds - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen (VDI 4640). Ausgefertigt 2001-9; Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Energietechnik, 2001.
- [24] Hirschl, Bernd et al.: Potenziale erneuerbarer Energien in Berlin 2020 und langfristig – Quantifizierung und Maßnahmengenerierung zur Erreichung ambitionierter Ausbauziele - Studie zum Berliner Energiekonzept (Anlage 6). In: Schriftenreihe des IÖW 198/11. Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, 2011.
- [25] Götzl, Gregor et al.: GEO-Pot: Seichtes Geothermie Potenzial Österreichs. Überregionale, interdisziplinäre Potenzialstudie zur Erhebung und Darstellung des oberflächennahen geothermischen Anwendungspotenzials auf Grundlage eines regelmäßigen Bearbeitungsrasters. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 5-6/2010. Wien; New York: Springer-Verlag, 2010.
- [26] UmweltAtlas Bayern. In [www.umweltatlas.bayern.de](http://www.umweltatlas.bayern.de) (Abruf am 2022-6-16); Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2022.
- [27] Informationssystem Oberflächennahe Geothermie für Baden-Württemberg. In <https://isong.lgrb-bw.de> (Abruf am 15.6.2022); Freiburg im Breisgau: Regierungspräsidium Freiburg Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, 2022.
- [28] Geothermie in NRW – Standortcheck. In [www.geothermie.nrw.de](http://www.geothermie.nrw.de) (Abruf am 16.6.2022); Krefeld: Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen – Landesbetrieb, 2022.



- [29] Energieatlas Thüringen. In <https://karte.energieatlas-thueringen.de> (Abruf am 15.6.2022); Erfurt: Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur GmbH, 2022.
- [30] ThermoMap. In [www.thermomap.eu](http://www.thermomap.eu) (Abruf am 14.6.2022); Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2013.
- [31] Solaratlas. In [www.geoportal-hamburg.de/solaratlas](http://www.geoportal-hamburg.de/solaratlas) (Abruf am 14.6.2022); Hamburg: Hamburg Energie, 2016.
- [32] Solaratlas Brandenburg. In <https://solaratlas-brandenburg.de> (Abruf am 16.6.2022); Potsdam: Wirtschaftsförderung Land Brandenburg GmbH, 2021.
- [33] Solar-Kataster. In [https://www.gpm-webgis-12.de/geoapp/frames/index\\_ext2.php?gui\\_id=hessen\\_sod\\_03](https://www.gpm-webgis-12.de/geoapp/frames/index_ext2.php?gui_id=hessen_sod_03) (Abruf am 17.6.2022); Wiesbaden: Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen, 2017.
- [34] Bautätigkeit und Wohnungen - Bestand an Wohnungen. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2021.
- [35] Kosfeld, Reinhold; Eckey, Hans; Türck, Matthias: Deskriptive Statistik - Grundlagen – Methoden – Beispiele – Aufgaben. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2016.
- [36] Kosfeld, Reinhold; Eckey, Hans-Friedrich; Türck, Matthias: Wahrscheinlichkeitsrechnung und Induktive Statistik - Grundlagen - Methoden - Beispiele. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2019.
- [37] OpenStreetMap und Mitwirkende: OpenStreetMap - Deutschland. Daten mit Open-Database-Lizenz veröffentlicht unter: <http://www.openstreetmap.org> (Abruf am 24.1.2022); Cambridge: OpenStreetMap Foundation, 2022.
- [38] 3D-Gebäudemodell NW LoD2: [www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/3dg/lod2\\_gml](http://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/3dg/lod2_gml) (Abruf am 14.9.2021); Köln: Bezirksregierung Köln, Geobasis NRW, 2021.
- [39] 3D-Stadtmodell LoD2-DE Hamburg: <https://metaver.de/trefferanzeige?docuuid=2C1F2EEC-CF9F-4D8B-ACAC-79D8C1334D5E> (Abruf am 13.9.2021); Hamburg: Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung, 2021.
- [40] 3D Stadtmodell LoD2: [www.geodaten.sachsen.de/downloadbereich-digitale-3d-stadtmodelle-4875.html](http://www.geodaten.sachsen.de/downloadbereich-digitale-3d-stadtmodelle-4875.html) (Abruf am 16.9.2021); Dresden: Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen, 2021.
- [41] 3D-Gebäudemodell LoD2: [www.geoportal-th.de/de-de/Downloadbereiche/Download-Offene-Geodaten-Thüringen/Download-3D-Gebäude](http://www.geoportal-th.de/de-de/Downloadbereiche/Download-Offene-Geodaten-Thüringen/Download-3D-Gebäude) (Abruf am 20.9.2021); Erfurt: Thüringer Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation, 2021.
- [42] 3D-Stadtmodell Berlin LoD2: [www.businesslocationcenter.de/berlin3d-downloadportal](http://www.businesslocationcenter.de/berlin3d-downloadportal) (Abruf am 24.9.2021); Berlin: Berlin Partner für Wirtschaft und Technologie GmbH, 2021.
- [43] 3D-Gebäude Land Brandenburg: [https://data.geobasis-bb.de/geobasis/daten/3d\\_gebaeude/lod2\\_gml](https://data.geobasis-bb.de/geobasis/daten/3d_gebaeude/lod2_gml) (Abruf am 13.9.2021); Potsdam: Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, 2021.
- [44] Frantz, David et al.: National-scale mapping of building height using Sentinel-1 and Sentinel-2 time series. In: Remote Sensing of Environment Vol. 252, 2021. Berlin: Earth Observation Lab, Geography Department, Humboldt-Universität zu Berlin, 2021.

- [45] Haushalte im 100 Meter-Gitter - Ergebnisse des Zensus am 9. Mai 2011 in Gitterzellen: <https://www.zensus2011.de/DE/Home/Aktuelles/DemografischeGrunddaten.html> (Abruf am 4.9.2020); Wiesbaden: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2018.
- [46] Zensus 2011 - Gebäude und Wohnungen - Übersicht über Merkmale und Merkmalsausprägungen, Definitionen. Wiesbaden: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014.
- [47] Gebäude und Wohnungen - Ergebnisse des Zensus am 9. Mai 2011: <https://www.zensus2011.de/DE/Home/Aktuelles/DemografischeGrunddaten.html> (Abruf am 12.1.2021); Wiesbaden: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014.
- [48] Bestand an Wohngebäuden und Wohnungen in Wohn- und Nichtwohngebäuden - Stichtag 31.12.2020 - regionale Tiefe: Gemeinden: [www.regionalstatistik.de/genesis/online?operation=table&code=31231-02-01-5](http://www.regionalstatistik.de/genesis/online?operation=table&code=31231-02-01-5) (Abruf am 20.1.2022); Deutschland: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2022.
- [49] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm). Ausgefertigt am 26.8.1998, Version vom 1.6.2017; Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2017.
- [50] Sperr, Alexander: Leitfaden Schall. Berlin: Bundesverband Wärmepumpe, 2016.
- [51] Solaratlas Hamburg. Hamburg: HAMBURG ENERGIE SOLAR GmbH, 2012.
- [52] Wärmepumpen-Ampel. In <https://waermepumpen-ampel.ffe.de> (Abruf am 19.10.2022); München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., 2022.
- [53] Potenzial. In <https://www.duden.de/rechtschreibung/Potenzial> (Abruf am 7.10.2022); Berlin: Cornelsen Verlag GmbH, 2022.
- [54] Energieflexible Fabrik – Grundlagen (VDI 5207). Ausgefertigt 10/2019, Version von 7/2020; Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 2020.
- [55] Kaltschmitt, Martin; Wiese, Andreas: Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 1997.
- [56] Kleines Lexikon zur Energiewende. In [www.energieatlas.bayern.de/energieatlas/lexikon#potenzial](http://www.energieatlas.bayern.de/energieatlas/lexikon#potenzial) (Abruf am 7.10.2022); München: Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, 2022.
- [57] Vergleichswerte für den Energieverbrauch von Nichtwohngebäuden. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 2019.
- [58] Absatzentwicklung Wärmepumpen in Deutschland 2011-2021 - Nach Absatz in den Neubau und in die Renovierung. In: [www.waermepumpe.de/fileadmin/user\\_upload/Mediengalerie/Zahlen\\_und\\_Daten/Absatzzahlen\\_Marktanteile/Diagramm\\_Verteilung\\_WP\\_auf\\_Nebau\\_und\\_Bestand\\_2011-2021.png](http://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/Mediengalerie/Zahlen_und_Daten/Absatzzahlen_Marktanteile/Diagramm_Verteilung_WP_auf_Nebau_und_Bestand_2011-2021.png) (Abruf am 1.7.2022); Berlin: Bundesverband Wärmepumpe e. V., 2022.
- [59] Conrad, Jochen: Modellierung und Bewertung von Maßnahmen zur kosteneffizienten CO<sub>2</sub>-Verminderung im Sektor private Haushalte. Dissertation. Herausgegeben durch Technische Universität München - Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik: München, 2020.

- [60] Greif, Simon; Freiburger, Leona; Corradini, Roger; Trentmann, Lennart; Schenk, Werner: Wärmepumpen in Bestandsgebäuden - Möglichkeiten und Herausforderungen im Eigenheim. Ludwigsburg: Wüstenrot Stiftung, 2022.
- [61] Mikrozensus - Zusatzerhebung 2014 - Sonderauswertung: Bewohnte Wohnungen nach Art der Nutzung, Gebäudegröße, Baujahr und Beheizung - Sammelheizungen disaggregiert. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2017.
- [62] Fattler, Steffen et al.: Dynamis Hauptbericht - Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., 2019.
- [63] Erler, Frank et al.: Anwendungspotenziale der Gaswärmepumpe - Optimierung der Umweltwärmeeinkopplung mit Sonde/Erdkollektor/Außenluft-WT im System Gebäude/Anlagentechnik/Nutzer. Essen: Gas- und Wärme-Institut Essen e. V., 2012.
- [64] Gas- und Hybridwärmepumpen für den Gebäudebestand. München: Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie, 2016.
- [65] Günther, Danny et al.: Wärmepumpen in Bestandsgebäuden - Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt "WPSmart im Bestand". Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, 2020.
- [66] Überblickspapier Osterpaket: [www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0406\\_ueberblickspapier\\_osterpaket.pdf](http://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0406_ueberblickspapier_osterpaket.pdf) (Abruf am 24.6.2022). Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022.
- [67] Recknagel, Hermann; Sprenger, Eberhard; Schramek, Ernst-Rudolf: Recknagel – Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 78. Ausgabe 2017/2018 - einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte. München: Karl-Joseph Albers, 2016.
- [68] Kaltschmitt, Martin et al.: Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2020.
- [69] Hartl, Michael et al.: Österreichische Technologie-Roadmap für Wärmepumpen. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2016.
- [70] Freeden, Willi et al.: Handbuch Oberflächennahe Geothermie. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2018.
- [71] Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland, Mittlere Jahressummen, Zeitraum 1981-2000. Hamburg: Deutscher Wetterdienst, 2004.
- [72] Hadorn, Jean-Christophe: Solar and Heat Pump Systems for Residential Buildings. Berlin: Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, 2015.
- [73] Brunk, Marten et al.: Dezentrale Wärmerückgewinnung aus häuslichem Abwasser. Stuttgart: Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau, 2012.
- [74] Ortner, Sara et al.: Berichtspflicht gemäß der Richtlinie (EU) 2018/2001 zum Potenzial der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen - Bewertung des Potenzials im Bereich der Energie aus erneuerbaren Quellen und der Nutzung von Abwärme und -kälte im Wärme- und Kältesektor in der Bundesrepublik Deutschland. Berlin: Bundesrepublik Deutschland, 2020.

- [75] Kammer, Henriette: Thermische Seewassernutzung in Deutschland - Bestandsanalyse, Potential und Hemmnisse seewasserbetriebener Wärmepumpen. Dissertation. Julius-Maximilians-Universität Würzburg. Herausgegeben durch Springer Vieweg: Wiesbaden, 2018.
- [76] ohsome - OpenStreetMap History Analyzer. In <https://ohsome.org/apps/dashboard> (Abruf am 9.7.2022); Heidelberg: HeiGIT gGmbH, 2022.
- [77] OpenStreetMap und Mitwirkende: OpenStreetMap - Deutschland. Daten mit Open-Database-Lizenz veröffentlicht unter: <http://www.openstreetmap.org> (Abruf am 2.2.2021); Cambridge: OpenStreetMap Foundation, 2021.
- [78] Zensus 2011 - Methoden und Verfahren. Wiesbaden: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2015.
- [79] Zensus 2011, Gebäude- und Wohnungsbestand in Deutschland - Endgültige Ergebnisse. Hannover: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2015.
- [80] Referenz Gemeinden und Gemeindeverbände, Stadt- und Gemeindetyp (Stand 31.12.2017): [www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/deutschland/gemeinden/StadtGemeindetyp/download-ref-sgtyp.xlsx](http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/deutschland/gemeinden/StadtGemeindetyp/download-ref-sgtyp.xlsx) (Abgerufen am 16.6.2022); Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 2017.
- [81] Verwaltungsgebiete 1:2500000 - Stand: 1.1.2016. Frankfurt am Main: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2016.
- [82] Carr, Lloyd: National-scale building type classification using open data in the context of heatpump applicability. Masterarbeit [Manuskript in Bearbeitung], betreut durch die Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., 2023.
- [83] CORINE Land Cover 5 ha DE 2018: <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/corine-land-cover-5-ha-stand-2018-clc5-2018.html> (Abruf am 7.3.2021); Frankfurt am Main: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2018.
- [84] Urban Atlas. In: <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas> (Abruf am 20.2.2020); Kopenhagen: European Environment Agency, 2020.
- [85] Bestand an Wohngebäuden und Wohnungen in Wohn- und Nichtwohngebäuden - Stichtag 31.12.2020 - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte; Deutschland: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2022.
- [86] Baukosten Gebäude Altbau - Statistische Kostenkennwerte. Stuttgart: Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH, 2020.
- [87] Baukosten Gebäude Neubau - Statistische Kostenkennwerte. Stuttgart: Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH, 2018.
- [88] Kemmler, Andreas et al.: Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005 – 2014 - Endbericht. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt für Mensch und Umwelt, 2017.
- [89] Corradini, Roger: Regional differenzierte Solarthermie-Potenziale für Gebäude mit einer Wohneinheit. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum. Herausgegeben durch die Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.: München, 2013.

- [90] Corbane, Christina et al.: GHS built-up grid, derived from Landsat, multitemporal (1975-1990-2000-2014), R2018A; Ispra: Europäische Kommission, Joint Research Centre, 2018. DOI: 10.2905/jrc-ghsl-10007.
- [91] Muñoz Sabater, Joaquín: ERA5-Land hourly data from 1981 to present: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land> (Abruf 16.6.2021), Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, 2021. DOI: 10.24381/cds.e2161bac.
- [92] Bigalke, Uwe et al.: Der dena-Gebäudereport 2016. - Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2016.
- [93] Hecht, Robert: Automatische Klassifizierung von Gebäudegrundrissen - Ein Beitrag zur kleinräumigen Beschreibung der Siedlungsstruktur in: IÖR Schriften 63/2014. Dresden: Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V., 2014.
- [94] Pribeagu, Mihai: Predicting the electric energy consumption of residential buildings using machine learning methods. Bachelorarbeit. Herausgegeben durch die Hochschule München – Fakultät für Geoinformation: München, 2022.
- [95] Pesaresi, Martino et al.: GHS built-up surface grid, derived from Sentinel2 composite and Landsat, multitemporal (1975-2030); Ispra: Europäische Kommission, Joint Research Centre, 2022. DOI: 10.2905/D07D81B4-7680-4D28-B896-583745C27085.
- [96] Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen für die Raumbeheizung und -kühlung und Prozess-Kühler mit elektrisch angetriebenen Verdichtern (DIN EN 14511). Ausgefertigt 7/2019; Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2019.
- [97] Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen - Elektrowärmepumpen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung (VDI 4650). Ausgefertigt 3/2019; Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt, 2019.
- [98] Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über fluoridierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006 (Verordnung (EU) Nr. 517/2014). Ausgefertigt am 16.4.2014; Straßburg: Europäische Union, 2014.
- [99] Conrad, Jochen, Greif, Simon: Modelling Load Profiles of Heat Pumps. In: Energies Special Issue "Energy Efficiency in Plants and Buildings" Volume 12 Issue 4. Basel: MDPI, 2019.
- [100] Greif, Simon; Mayer, Florian: Wärmepumpen-Fahrplan - Finanzielle Kippunkte zur Modernisierung mit Wärmepumpen im Wohngebäudebestand. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., 2021.
- [101] Merkblatt zu den förderfähigen Kosten - Heizen mit Erneuerbaren Energien (Version 4.0 vom 26.3.2020). Eschborn: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, 2020.
- [102] Gruss, Roman: Das Viessmann Heiztechniklexikon - H wie Heizkennlinie. In: <https://www.viessmann-community.com/t5/Innovations-Blog/Das-Viessmann-Heiztechniklexikon-H-wie-Heizkennlinie/ba-p/1338> (Abruf am 31.1.2019); Allendorf: Viessmann, 2014.
- [103] Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 200: Installation Typ A (geschlossenes System) - Planung, Bauteile, Apparate, Werkstoffe (DIN 1988-200). Ausgefertigt 1988, Version von 5/2012; Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 2012.

- [104] Gerhardy, Karin: Das DVGW-Arbeitsblatt W 551 und die 3-Liter-Regel. Bonn: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs e. V., 2012.
- [105] Obrecht, Annika: Decarbonizing the German building stock - Comparative analysis of solar, air and ground-source heat pump systems for representative residential building types. Masterarbeit. Herausgegeben durch die Freie Universität Bozen, betreut durch die Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.: Bozen, 2020.
- [106] Energetische Bewertung von Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast (DIN EN 12831). Ausgefertigt 2017-9; Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2017.
- [107] Weiersmüller, René: Zur Leistungsbemessung von Ersatzkesseln für Wohnbauten auf der Basis des langjährigen Brennstoffverbrauchs. In: Heizung Klima 5/1993. Aarau: AT Zeitschriftenverlag, 1993.
- [108] Fraga, Carolina et al.: Heat pump systems for multifamily buildings: Potential and constraints of several heat sources for diverse building demands. Genf: Universität Genf, 2018.
- [109] Mojic, Igor et al.: Heat pump system with uncovered and free ventilated covered collectors in combination with a small ice storage. Freiburg: International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, 2013.
- [110] Prinzing, Manuel et al.: Ausblick auf mögliche Entwicklungen von Wärmepumpen-Anlagen bis 2050. Bern: Bundesamt für Energie, 2019.
- [111] Kruse, Jürgen et al.: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Teil B. Köln: ewi Energy Research & Scenarios gGmbH, 2018.
- [112] Gerhardt, Norman et al.: Wärmewende 2030 - Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor. Berlin: Agora Energiewende, 2017.
- [113] Formelsammlung Akustik - Mathematische Grundlagen. Karlsruhe: Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, 2020.
- [114] Greif, Simon et al.: Potential of air-source heat pumps complying with sound immission limits in the German building stock. In: ETG Congress 2021; Frankfurt am Main: Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., 2021.
- [115] Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen (DIN 4109-1). Ausgefertigt am 1.1.2018; Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2018.
- [116] Sinambari, Gh. Reza et al.: Ingenieurakustik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2020.
- [117] Leitfaden für die Verbesserung des Schutzes gegen Lärm bei stationären Geräten (Klimageräte, Kühlgeräte, Lüftungsgeräte, Luft-Wärme-Pumpen und Mini-Blockheizkraftwerke). Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz, 2020.
- [118] Schallrechner. In [www.waermepumpe.de/schallrechner](http://www.waermepumpe.de/schallrechner) (Abruf am 22.6.2022); Berlin: Bundesverband Wärmepumpe e. V., 2022.
- [119] Lärm bekämpfen – Ruhe schützen. Karlsruhe: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 2004.

- [120] Datenblätter von Luft/Wasser-Wärmepumpen. In <https://vibooks.viessmann.com> (Abruf am 23.6.2022; Allendorf: Viessmann Climate Solutions SE, 2022.
- [121] Technische Daten von Luft/Wasser-Wärmepumpen. In [www.vaillant.de/heizung/produkte/produktgruppen/waermepumpe](http://www.vaillant.de/heizung/produkte/produktgruppen/waermepumpe) und [www.vaillant.de/heizung/service/dokumente](http://www.vaillant.de/heizung/service/dokumente) (Abruf am 23.6.2022); Remscheid: Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG, 2022.
- [122] Energiedatenblätter von Luft/Wasser-Wärmepumpen. In [www.bosch-thermotechnology.com/de/de/wohngebaeude/service-und-support/dokumente](http://www.bosch-thermotechnology.com/de/de/wohngebaeude/service-und-support/dokumente) (Abruf am 24.6.2022); Wernau: Bosch Thermotechnik GmbH, 2022.
- [123] Bedienungs- und Installationsanleitung von Luftwärmepumpen. In [www.stiebel-eltron.de/de/home/service/downloads.html](http://www.stiebel-eltron.de/de/home/service/downloads.html) (Abruf am 22.6.2022); Holzminden: STIEBEL ELTRON GmbH & Co. KG, 2022.
- [124] Planungshandbücher zu Luft/Wasser-Wärmepumpen. In [www.mitsubishi-les.com/de-de/suche.html?content\\_type=documents](http://www.mitsubishi-les.com/de-de/suche.html?content_type=documents) (Abruf am 24.6.2022); Ratingen: Mitsubishi Electric Europe B.V., 2022.
- [125] Maschinendatenblätter von Luft/Wasser-Wärmepumpen. In [www.ochsner.com/de-de/service/download](http://www.ochsner.com/de-de/service/download) (Abruf am 24.6.2022); Haag: OCHSNER Wärmepumpen GmbH, 2022.
- [126] Planungsunterlagen für Luft/Wasser-Wärmepumpen. In [www.wolf.eu/de-de/professional/downloads/downloadcenter](http://www.wolf.eu/de-de/professional/downloads/downloadcenter) (Abruf am 27.6.2022); Mainburg: WOLF GmbH, 2022.
- [127] Betriebsanleitungen von Luft/Wasser-Wärmepumpen. In [www.novelan.com/endkunde/downloads/betriebsanleitungen.html](http://www.novelan.com/endkunde/downloads/betriebsanleitungen.html) (Abruf am 27.6.2022); Kasendorf: ait-deutschland GmbH, 2022.
- [128] Montage und Betriebsanleitungen von Luft/Wasser-Wärmepumpen. In [www.weishaupt.de/service/informationmaterial](http://www.weishaupt.de/service/informationmaterial) (Abruf am 27.6.2022); Schwendi: Max Weishaupt GmbH, 2022.
- [129] Produktdaten - Luft-Wasser Wärmepumpen Luft-Luft Wärmepumpen Wohnraumlüftung House Climate Control Pufferspeicher. In [www.templari.com/wp-content/uploads/2022/01/CATALOGO-TECNICO-DE-2021-09122021.pdf](http://www.templari.com/wp-content/uploads/2022/01/CATALOGO-TECNICO-DE-2021-09122021.pdf) (Abruf am 28.6.2022); Rubano: Templari SRL, 2021.
- [130] Datenblätter von Luft/Wasser-Wärmepumpen. In <https://awe.bayern/awe-elw-luft-wasser-splitwaermepumpe-.html> (Abruf am 28.6.2022); Eggenfelden: AWE ALTERNATIV WÄRME ENERGIE AG, 2022.
- [131] Datenblätter von Luft/Wasser-Wärmepumpen. In <https://dimplex.de/dimplex/dokumente> (Abruf am 28.6.2022); Kulmbach: Glen Dimplex Deutschland GmbH, 2022.
- [132] Datenblatt Luft/Wasser-Wärmepumpe. In <https://rennergy.de/produkte/waermepumpe/luft-wasser> (Abruf am 30.6.2022); Buchenberg: RENNERGY Systems AG, 2022.
- [133] Übersichtsdatenblatt Luft-Wasser Wärmepumpen. In <https://mack-thermotechnik.de/download> (Abruf am 29.6.2022); Hofheim-Wallau: Aereco GmbH, 2022.
- [134] Technische Datenblätter von Luft/Wasser-Wärmepumpen. In [www.eqtherm.de/downloads](http://www.eqtherm.de/downloads) (Abruf am 29.6.2022); Dürrholz-Daufenbach: EQtherm GmbH, 2022.

- [135] Bedienungs- u. Installationsanleitungen Luft/Wasser-Wärmepumpen. In [www.tecalor.de/de/tools-services/downloads.html](http://www.tecalor.de/de/tools-services/downloads.html) (Abruf am 29.6.2022); Holzminden: tecalor GmbH, 2022.
- [136] Produktbeschreibungen von Luft/Wasser-Wärmepumpen. In [www.hoval.de/de\\_DE/Heiztechnik/Waermepumpen/c/G\\_heat-pump](http://www.hoval.de/de_DE/Heiztechnik/Waermepumpen/c/G_heat-pump) (Abruf am 28.6.2022); Aschheim: Hoval GmbH, 2022.
- [137] Thermische Nutzung des Untergrunds - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen (VDI 4640). Ausgefertigt 6/2019; Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt, 2019.
- [138] Ramming, Klaus: Bewertung und Optimierung oberflächennaher Erdwärmekollektoren für verschiedene Lastfälle. Dissertation. Herausgegeben durch Technische Universität Dresden - Fakultät Maschinenwesen: Dresden, 2007.
- [139] Erdwärmekollektoren. In [www.lfu.bayern.de/geologie/oberflaechennahe\\_geothermie/erlaeuterungen\\_fachthemen/kollektoren](http://www.lfu.bayern.de/geologie/oberflaechennahe_geothermie/erlaeuterungen_fachthemen/kollektoren). (Abruf am 15.1.2021); Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2021.
- [140] Planung und Erstellung von Erdwärmesonden - Sole- oder wasserbetriebene Erdwärmesonden für Wärmepumpenanlagen mit einer Heizleistung bis maximal 30 kW - Merkblatt Nr. 3.7/2. Hof: Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2012.
- [141] BayernAtlas. In <https://geoportal.bayern.de/bayernatlas>. (Abruf am 2.2.2022); München: Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, 2022.
- [142] Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS). Stuttgart: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2018.
- [143] Wasserwirtschaftliche Anforderungen an die Nutzung von oberflächennaher Erdwärme - LANUV-Arbeitsblatt 39. Recklinghausen: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2019.
- [144] Leitfaden zur Nutzung von oberflächennaher Geothermie mit Erdwärmesonden - Grundwasserschutz und Erlaubnisverfahren. Mainz: Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz; Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau Rheinland-Pfalz, 2020.
- [145] Leitfaden oberflächennahe Geothermie im Land Bremen. Bremen: Geologischer Dienst für Bremen, 2022.
- [146] Leitfaden zur geothermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes - Erdwärmekollektoren – Erdwärmesonden Empfehlungen für Planer, Ingenieure und Bauherren. Flintbek: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, 2011.
- [147] Ebner, Michael: Beitragsreihe FREM: Das Windszenario-Tool WiSTI. In: <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/beitragsreihe-frem-das-windszenario-tool-wistl/>. (Abruf am 21.2.2022); München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., 2022.
- [148] Bodenarten der Oberböden Deutschlands 1:1.000.000 (BOART1000OB V2.0): <https://produktcenter.bgr.de/terraCatalog/DetailResult.do?fileIdentifier=DADB8BB6-4A7A-4CB7-908D-EA0767B068D7>; Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2007.



- [149] Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland (DIN 4710). Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2003.
- [150] Bundesberggesetz (BBergG). Ausgefertigt am 13.8.1980, Version vom 14.6.2021, 2021.
- [151] Auswertung realisierter Bohrtiefen von Erdwärmesonden in Deutschland [Unveröffentlichte Daten]; Bad Wurzach: BauGrund Süd Gesellschaft für Geothermie mbH, 2021.
- [152] Wasserhaushaltsgesetz - WHG - Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts in: BGBl. I S. 2585. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2009.
- [153] Hoppe, Silvio: Ist Erdwärme in einem Wasserschutzgebiet möglich? In: <http://erdwaermezeitung.de/ist-erdwaerme-in-einem-wasserschutzgebiet-moeglich> (Abruf am 24.2.2021); Hohenstein – Ernstthal: Erdwärme & Bohrtechnik GmbH Sachsen, 2014.
- [154] Bodenschätze der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 (BSK1000 V1.2): <https://produktcenter.bgr.de/terraCatalog/DetailResult.do?fileIdentifier=7F12ED28-84DA-4AAE-AEDB-33310962705E> (Abruf am 20.1.2022); Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2007.
- [155] Wasserschutzgebiete-DE: <https://geoportal.bafg.de/inspire/download/AM/servicefeed.xml> (Abruf am 15.6.2021); Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2020.
- [156] Minder, Stefan et al.: Eisspeicher-Wärmepumpen-Anlagen mit Sonnenkollektoren - Technologiestudie. Bern: EnergieSchweiz, 2014.
- [157] Eis-Energiespeichersystem Projektplanung für Vitocal Sole/Wasser-Wärmepumpen - Planungsanleitung. Allendorf: Viessmann Climate Solutions SE, 2022.
- [158] Eisspeichersystem für Vitocal Sole/Wasser Wärmepumpen - Planungsanleitung. Allendorf: Viessmann Werke GmbH & Co KG, 2014.
- [159] Jetter, Fabian: GIS-gestützte Analyse des Photovoltaik-Potenzials einer Großstadt anhand siedlungsgenetischer Merkmale. Masterarbeit. Herausgegeben durch die Universität Augsburg, betreut durch die Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.: München, 2015.
- [160] Baugruben und Gräben – Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten (DIN 4124). Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2012.
- [161] Ausschachtungen, Gründungen und Unterfangungen im Bereich bestehender Gebäude (DIN 4123). Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2013.
- [162] VITOCAL 2-stufige Wärmepumpe mit SPS-Regelung Sole/Wasser-Wärmepumpe 84,9 bis 222,2 kW Luft/Wasser-Anwendung 91,4 bis 192,2 kW - Planungsanleitung. Steinhaus bei Wels: Viessmann GmbH, 2020.
- [163] Krapf, Sebastian et al.: RID — Roof Information Dataset for Computer Vision-Based Photovoltaic Potential Assessment. In: Remote Sensing 14/2299. Basel: MDPI, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14102299>.
- [164] Brandes, Julian et al.: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem 2050 - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen – Update unter einer Zielvorgabe von 65% CO<sub>2</sub>-Reduktion in 2030 und 100% in 2050. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, 2020.

- [165] A Renovation Wave for Europe - greening our buildings, creating jobs, improving lives. Brüssel: Europäische Kommission, 2020.
- [166] Bertele, Simon: Kostenoptimale Reduktion des Heizwärmebedarfs im deutschen Wohngebäudebestand - Cost Optimized Reduction of the Net Spacing Heating Demand in the German Housing Sector. Masterarbeit. Herausgegeben durch die Technische Universität München - Fakultät für Architektur/Ingenieur fakultät Bau, Geo Umwelt, betreut durch die Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.: München, 2017.
- [167] Diefenbach, Nikolaus; Cischinsky, Holger; Rodenfels, Markus; Clausnitzer, Klaus-Dieter: Datenbasis Gebäudebestand – Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2010.
- [168] Backhaus, Karl-Heinz et al.: Branchenstudie 2018: Marktanalyse – Szenarien – Handlungsempfehlungen. Berlin: Bundesverband Wärmepumpe e. V., 2019.
- [169] Bründlinger, Thomas et al.: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2018.
- [170] Zahlen und Fakten Energiedaten - Nationale und internationale Entwicklung. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2017.
- [171] Ergebnisse ohne Grenzen: der Zensus-Atlas in: [www.zensus2011.de](http://www.zensus2011.de) (Abruf am 23.11.2015). Wiesbaden: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2015.
- [172] Erdbeobachtungsprogramm Copernicus: Pan-European - Reference Data. <http://land.copernicus.eu/pan-european/satellite-derived-products>. Kopenhagen: Europäische Umweltagentur, 2016.
- [173] OpenStreetMap (OSM) - Die freie Wiki-Weltkarte. Veröffentlicht unter der freien CC-BY-SA-Lizenz durch OpenStreetMap und Mitwirkende. <http://www.openstreetmap.org> (Abruf am 24.11.2015), 2015.
- [174] Urban Atlas. Kopenhagen: Europäische Umweltagentur, 2015.
- [175] Digitales Landschaftsmodell 1:250000 (AAA-Modellierung). Leipzig: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie - GeoDatenZentrum, 2013.
- [176] Wellstein, Jürg: Fernwärme hat mehr Potenzial In: Swiss Engineering STZ. Zürich: Swiss Engineering STV, 2010.
- [177] Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse - Stellungnahme. Berlin: Sachverständigenrat für Umweltfragen, 2021.
- [178] Wietschel, Martin et al.: Preiselastische Wasserstoffnachfrage in Deutschland – Methodik und Ergebnisse. HYPAT Working Paper 01/2023. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2023.
- [179] Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG). Ausgefertigt am 12.12.2019, Version vom 18.8.2021; Bonn: Bundesministerin für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2021.
- [180] Starkes Wachstum im Wärmepumpenmarkt. <https://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/details/starkes-wachstum-im-waermepumpenmarkt> [Pressemitteilung vom 20.1.2022] Berlin: Bundesverband Wärmepumpe e. V., 2022.

- [181] Minder, Stefan et al.: Eisspeicher-Wärmepumpen-Anlagen mit Sonnenkollektoren – Wirtschaftlichkeit, Umweltbelastung und Marktpositionierung. Bern: EnergieSchweiz, 2016.
- [182] Sensfuß, Frank: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland - Treibhausgasneutrale Szenarien T45 [Überblickswebinar am 15.11.2022]. In: [www.langfristszenarien.de/enertile-explorerer-wAssets/docs/LFS3\\_T45\\_Szenarien\\_15\\_11\\_2022\\_final.pdf](http://www.langfristszenarien.de/enertile-explorerer-wAssets/docs/LFS3_T45_Szenarien_15_11_2022_final.pdf) (Abruf am 15.11.2022); Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2022.
- [183] Harper, Ryan et al.: Energiewende jetzt! Was konkret gemacht werden muss, um die bayerischen Klimaschutzziele zu erreichen. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., 2021.
- [184] Fattler, Steffen: Economic and Environmental Assessment of Electric Vehicle Charging Strategies. Dissertation. Herausgegeben durch die Technische Universität München - Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik: München, 2021.
- [185] Conrad, Jochen et al.: Evolution und Vergleich der CO<sub>2</sub>-Bewertungsmethoden von Wärmepumpen in: 3. Dialogplattform Power-to-Heat. Berlin: Energietechnische Gesellschaft - Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., 2017.
- [186] Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2014. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2016.
- [187] 65 Prozent erneuerbare Energien beim Einbau von neuen Heizungen ab 2024 - Konzeption zur Umsetzung. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz; Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2022.
- [188] Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt). Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., 2006.
- [189] Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA). Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., 2008.
- [190] Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL). Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., 2012.
- [191] Loga, Tobias et al.: TABULA - Scientific Report Germany - Further Development of the German Residential Building Typology. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2012.
- [192] Karte Stadt- und Gemeindetyp 2017. In <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/deutschland/gemeinden/StadtGemeindetyp/karte-stadt-gemeindetyp.gif> (Abruf am 16.6.2022); Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 2019.

## 13 Veröffentlichungen des Autors

Greif, Simon; Freiburger, Leona; Corradini, Roger; Trentmann, Lennart; Schenk, Werner: Wärmepumpen in Bestandsgebäuden – Möglichkeiten und Herausforderungen im Eigenheim. Ludwigsburg: Wüstenrot Stiftung, 2022.

Greif, Simon; Mayer, Florian: Wärmepumpen-Fahrplan - Finanzielle Kippunkte zur Modernisierung mit Wärmepumpen im Wohngebäudebestand. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., 2021.

Greif, Simon; Limmer, Timo; Mayer, Florian: Potential of air-source heat pumps complying with sound immission limits in the German building stock. ETG Kongress, 2021.

Greif, Simon; Kern, Barbara; Weigand, Andreas: Flexibilisierung von Speicherheizungen mittels Smart-Meter-Infrastruktur. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 7/2020. Berlin: EW Medien und Kongresse GmbH, 2020.

Greif, Simon; Obrecht, Annika; Corradini, Roger: Solarthermie vs. Photovoltaik - Welche Technologie ist aus Sicht der Wärmewende die zielführende Ergänzung elektrischer Wärmepumpen? In: Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, 2020.

Fattler, Steffen; Conrad, Jochen; Regett, Anika; Böing, Felix; Guminski, Andrej; Greif, Simon et al.: Dynamis Hauptbericht - Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., 2019.

Conrad, Jochen; Greif, Simon; Weißflog, Jan: Systemnutzen durch Lastflexibilisierung elektrischer Heizsysteme. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 10/2019. Berlin: EW Medien und Kongresse GmbH, 2019.

Greif, Simon; Weigand, Andreas: Flexibilität elektrischer Heizsysteme im Feldtest In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 06/2019. Berlin: EW Medien und Kongresse GmbH, 2019.

Greif, Simon; Magg, René; Corradini, Roger: Wärmepumpen – Schlüssel zur Wärmewende? In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 5/2019. Berlin: EW Medien und Kongresse GmbH, 2019.

Conrad, Jochen; Greif, Simon: Modelling Load Profiles of Heat Pumps. In: Energies Special Issue "Energy Efficiency in Plants and Buildings" Volume 12 Issue 4. Basel: MDPI, 2019.

Greif, Simon; Conrad, Jochen; Schmid Tobias: Methoden zur Erstellung synthetischer Wärmelastgänge. In: et - Energiewirtschaftliche Tagesfragen - Zeitschrift für Energiewirtschaft, Recht, Technik und Umwelt 10/2018. Berlin: EW Medien und Kongresse GmbH, 2018.

Konetschny, Claudia; Schmid, Tobias; Greif, Simon: Oberflächennahe Geothermie im außerstädtischen Wohngebäudebestand - Potenzialanalyse zur Nutzung von Erdwärmepumpen im Gebäudebestand. In: BWK Bd. 70 (2018) Nr. 7/8. Düsseldorf: VDI Verlag, 2018.

Conrad, Jochen; Greif, Simon: Modelling the Private Households Sector and the Impact on the Energy System. 41st IAEE conference, Groningen, 2018.

Corradini, Roger; Conrad, Jochen; Greif, Simon: Energierationalität im Eigenheim - Effiziente Energieversorgung von Wohngebäuden. Ludwigsburg: Wüstenrot Stiftung, 2018.

Corradini, Roger; Conrad, Jochen; Greif, Simon: Wärmewende im Heizungskeller. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen (et) 03/2018. Berlin: EW Medien und Kongresse GmbH, 2018.

Conrad, Jochen; Greif, Simon et al.: Flexibilisierung der Kraft-Wärme-Kopplung (Studie zum Szenariorahmen des Netzentwicklungsplans Strom 2030). München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., 2017.

Conrad, Jochen; Greif, Simon et al.: Evolution und Vergleich der CO<sub>2</sub>-Bewertungsmethoden von Wärmepumpen in: 3. Dialogplattform Power-to-Heat. Berlin: Energietechnische Gesellschaft - Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., 2017.

Conrad, Jochen; Corradini, Roger; Greif, Simon: Vergleich der Emissionen von Solarthermieanlagen und Wärmepumpensystemen in: 27. Symposium Thermische Solarenergie. Regensburg: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V., 2017.

Rasch, Manuel.; Regett, Anika; Pichlmaier, Simon; Conrad, Jochen; Greif, Simon et. al.: Eine anwendungsorientierte Emissionsbilanz - Kosteneffiziente und sektorenübergreifende Dekarbonisierung des Energiesystems in: BWK 03/2017, Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2017.

Greif, Simon et al.: Zukunftsfähigkeit von Heizsystemen in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 67.Jg. (2017) Heft 4. Essen: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 2017.

Conrad, Jochen; Greif, Simon: Dynamik der Energiewende - Wie lassen sich Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen quantifizieren? in: 10. Internationale Energiewirtschaftstagung. Wien: Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe der Technischen Universität Wien, 2017.

# 14 Anhang

Tabelle 14-1: Baualtersklassen (Mikrozensus-Klassen) nach [47]

Nr.	Baualtersklasse
1	vor 1919
2	1919 – 1948
3	1949 – 1978
4	1979 – 1986
5	1987 – 1990
6	1991 - 1995
7	1996 - 2000
8	2001 - 2004
9	2005 - 2008
10	2009 und später

Tabelle 14-2: Breite von Straßen in besiedelten Gebieten, auf Basis von Annahmen, [188], [189] und [190]

Straßenkategorie (Bezeichnung in OpenStreetMap)	Breite in m					
	Gesamt	Gehweg 1	Park- bucht 1	Straße	Park- bucht 2	Gehweg 2
Anwohnerstraße (living street)	9,5	1,5	-	6,5	-	1,5
Hauptstraße (residential)	11,5	1,5	2	6,5	-	1,5
Staatsstraße (tertiary)	14	2,5	2	7	-	2,5
Bundesstraße (secondary)	16	2,5	2	7	2	2,5
Autobahn (primary)	20	-	-	20	-	-

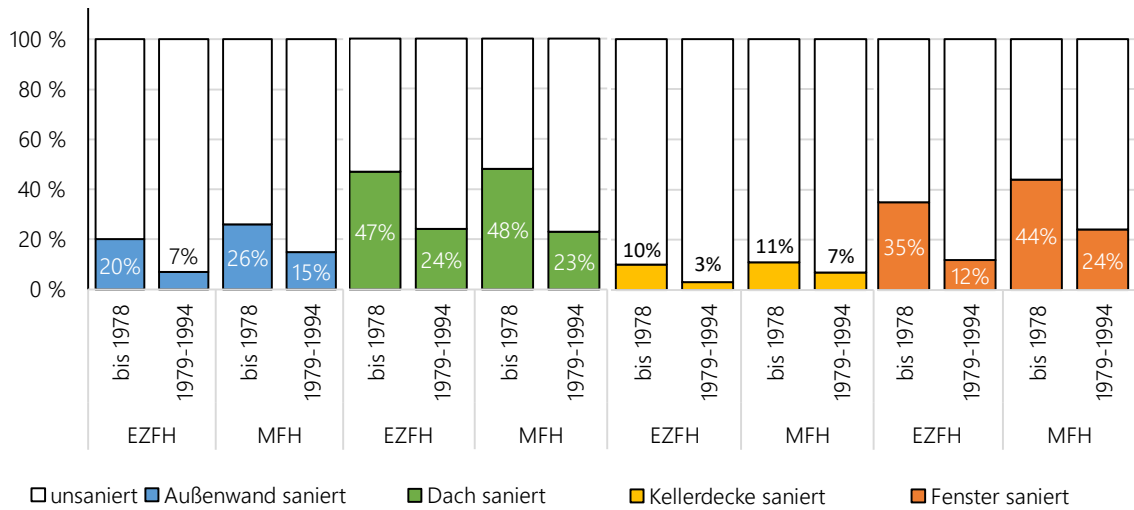


Abbildung 14-1: Anteil der sanierten Bauteilflächen, Darstellung aus [59] auf Basis von [191]

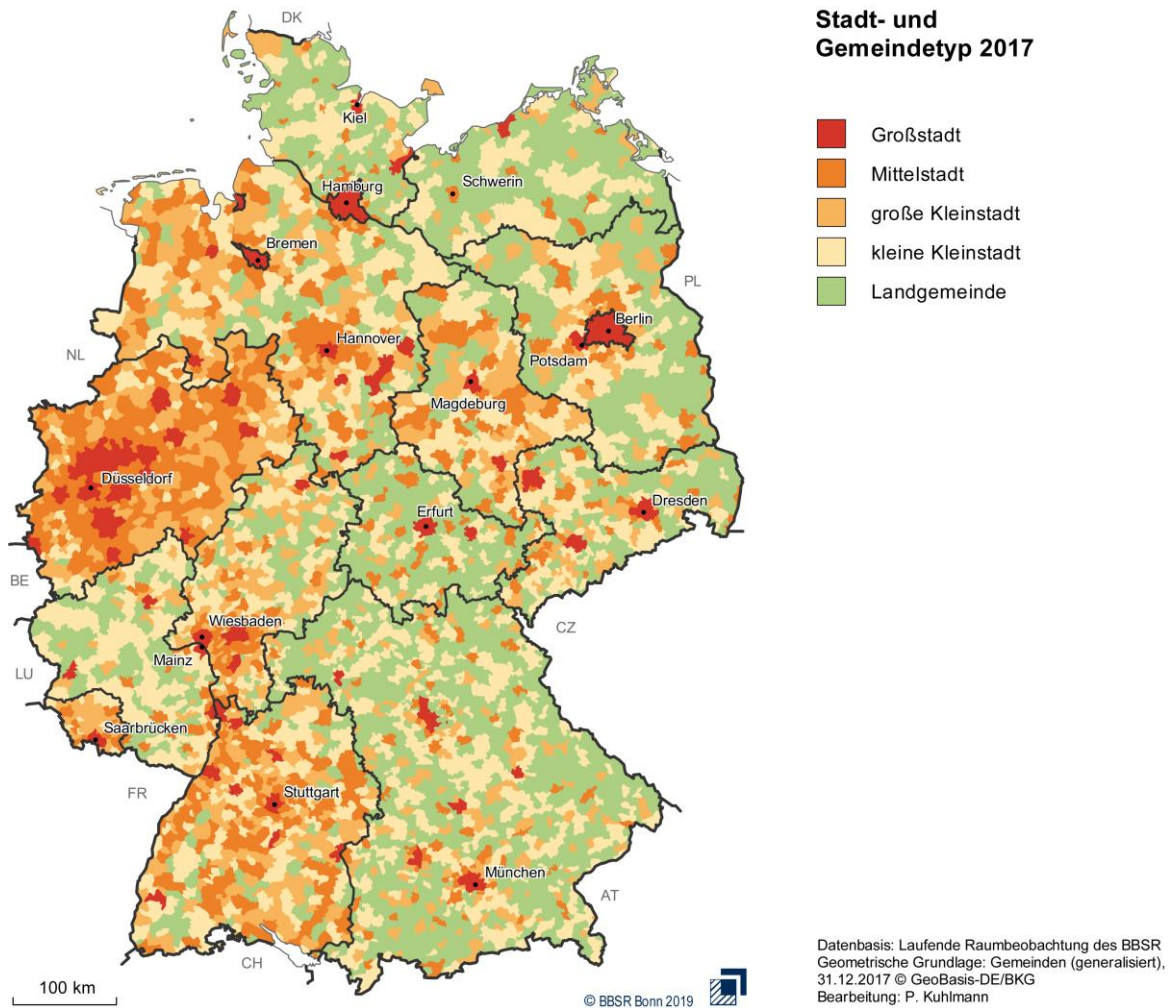
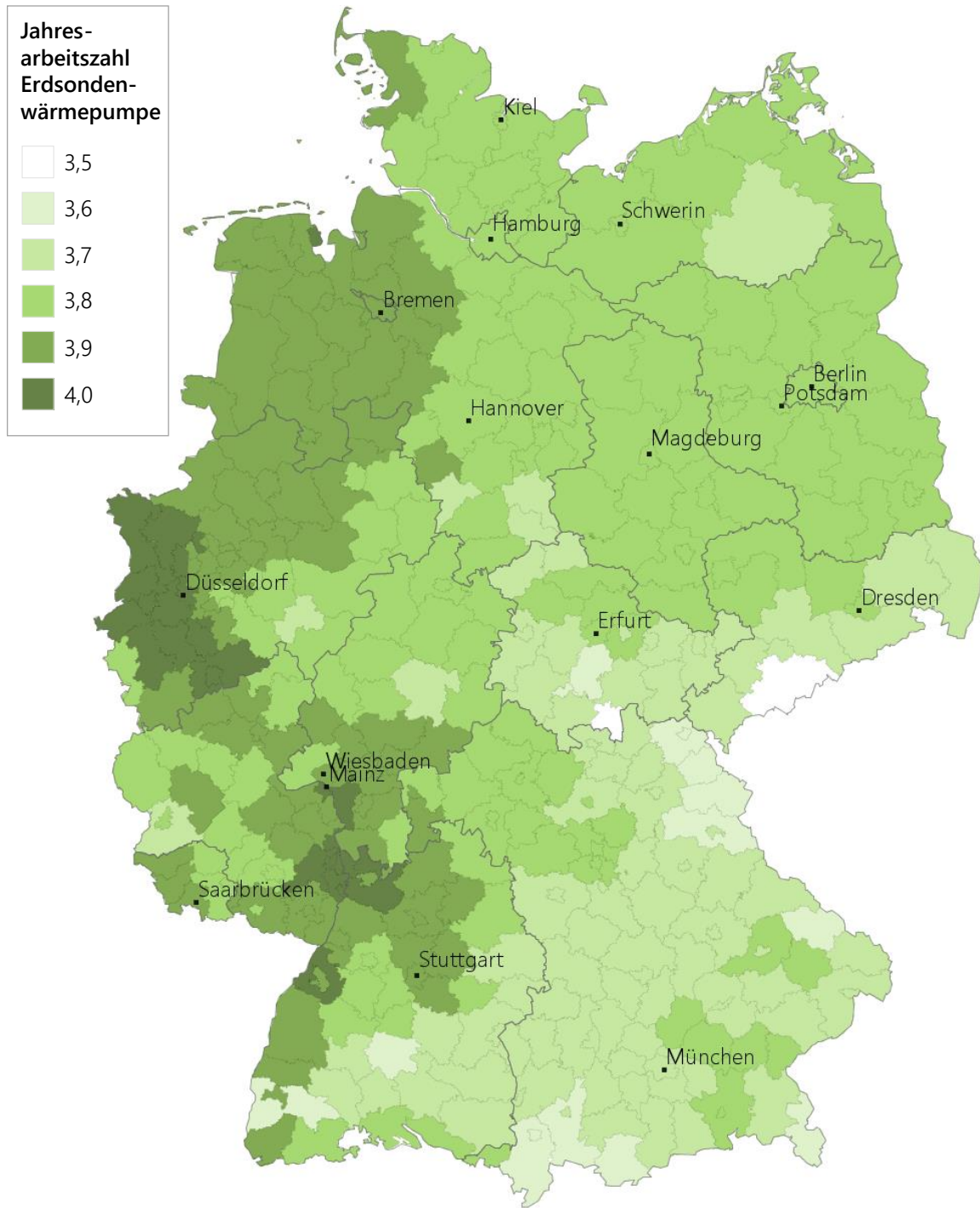


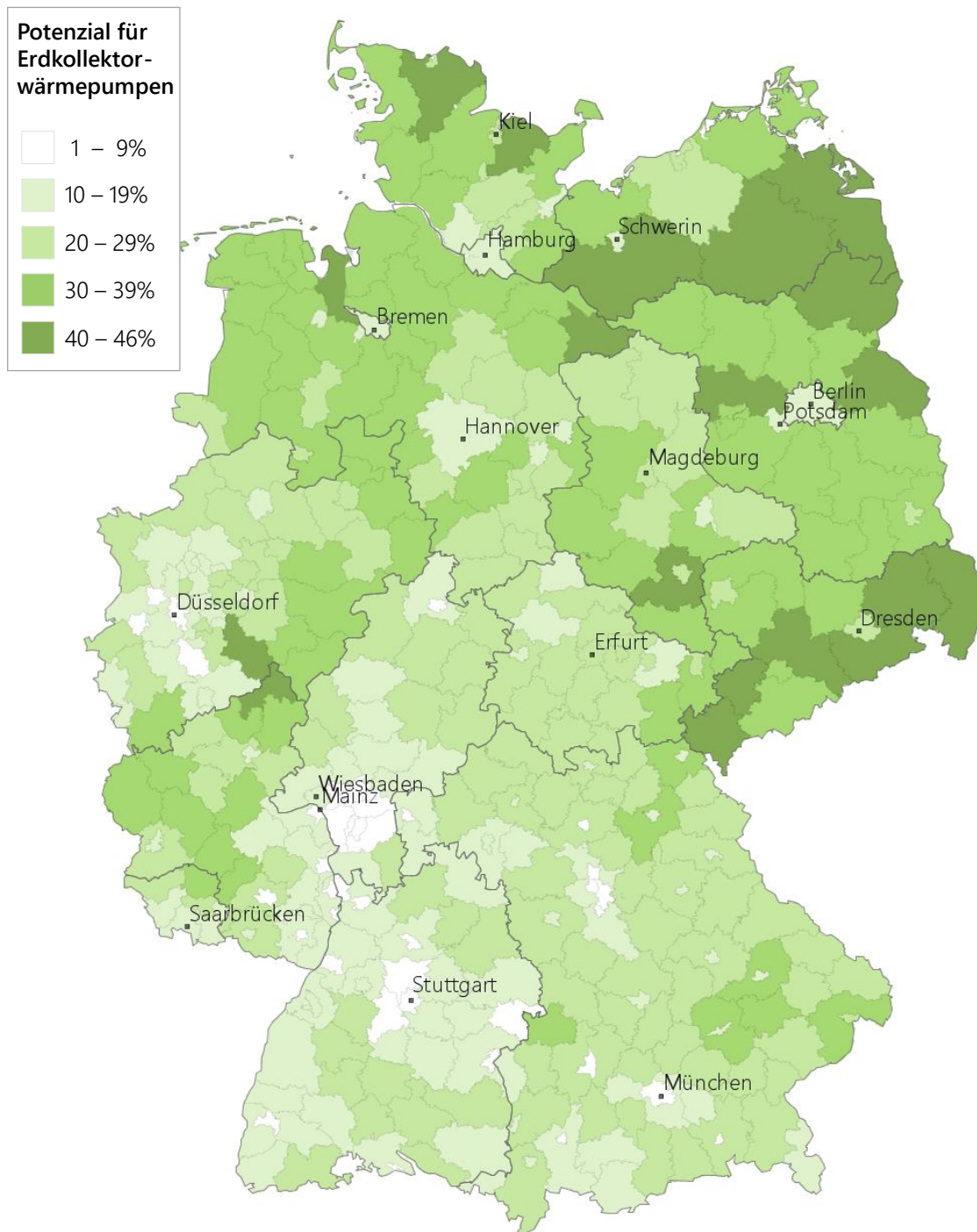
Abbildung 14-2: Stadt- und Gemeindetyp 2017 [192]



Administrative Grenzen: © GeoBasis-DE / BKG-2017 | Generalisierung FfE

Abbildung 14-3: Jahresarbeitszahl von Erdsondenwärmepumpen in Ein-/Zweifamilienhäusern mit Baujahr vor 1979 im Jahr 2022





Administrative Grenzen: © GeoBasis-DE / BKG-2017 | Generalisierung FfE

Abbildung 14-4: Potenzial für Erdkollektorwärmepumpen je Landkreis im Jahr 2022

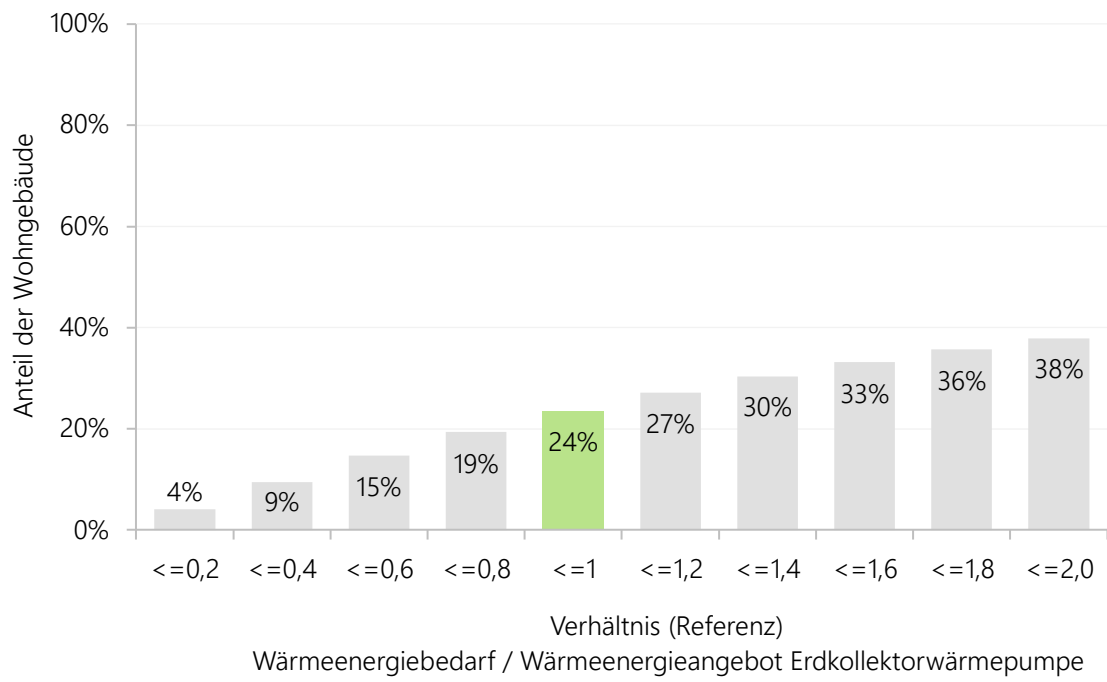
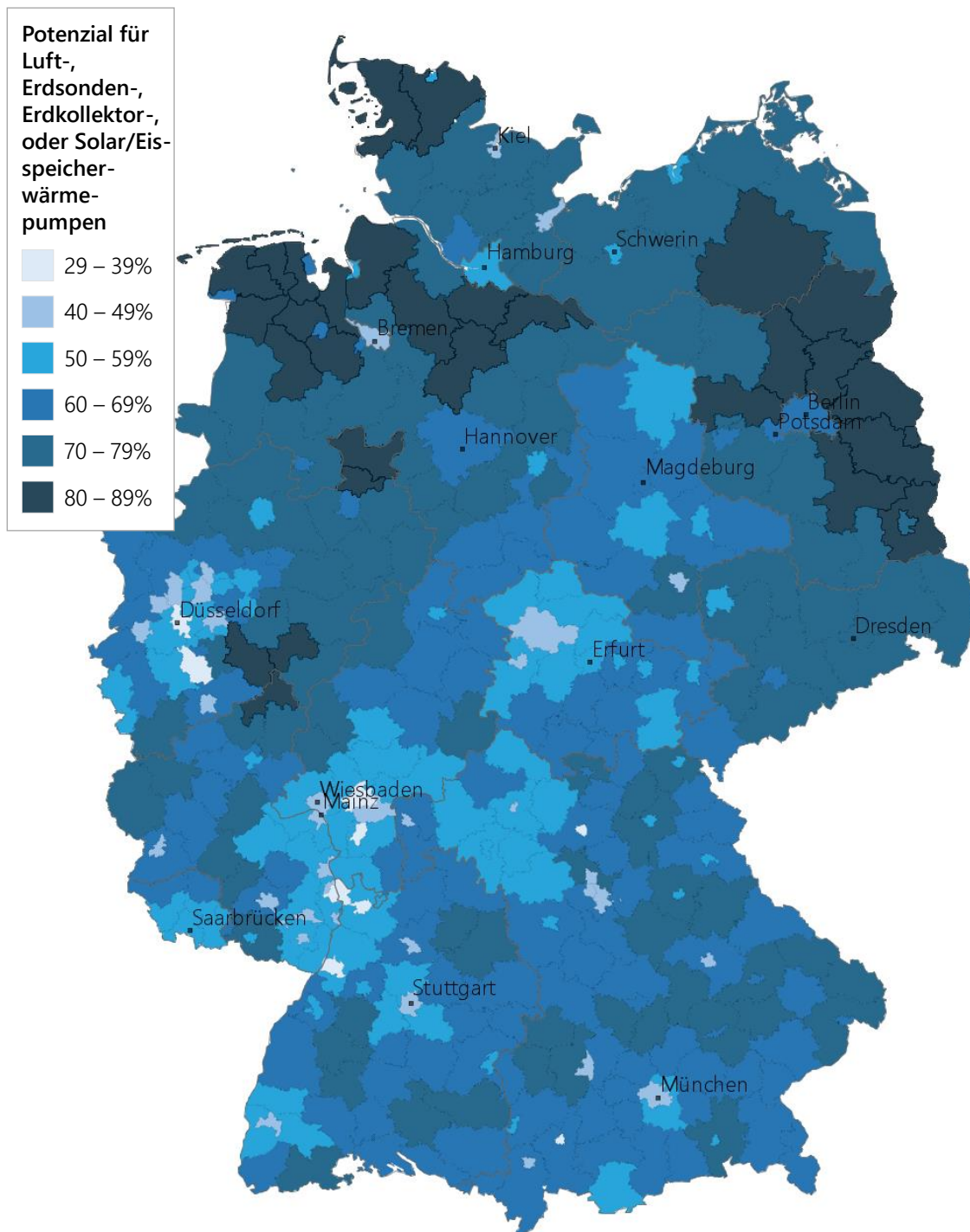


Abbildung 14-5: Anteil der Gebäude gegenüber dem Verhältnis von Wärmeenergiebedarf zu Wärmeenergieangebot Erdkollektorpumpe



Administrative Grenzen: © GeoBasis-DE / BKG-2017 | Generalisierung FfE

Abbildung 14-6: Potenzial aller untersuchten Wärmequellen (Luft, Erde oder Solar/Eisspeicher) je Landkreis im Jahr 2022