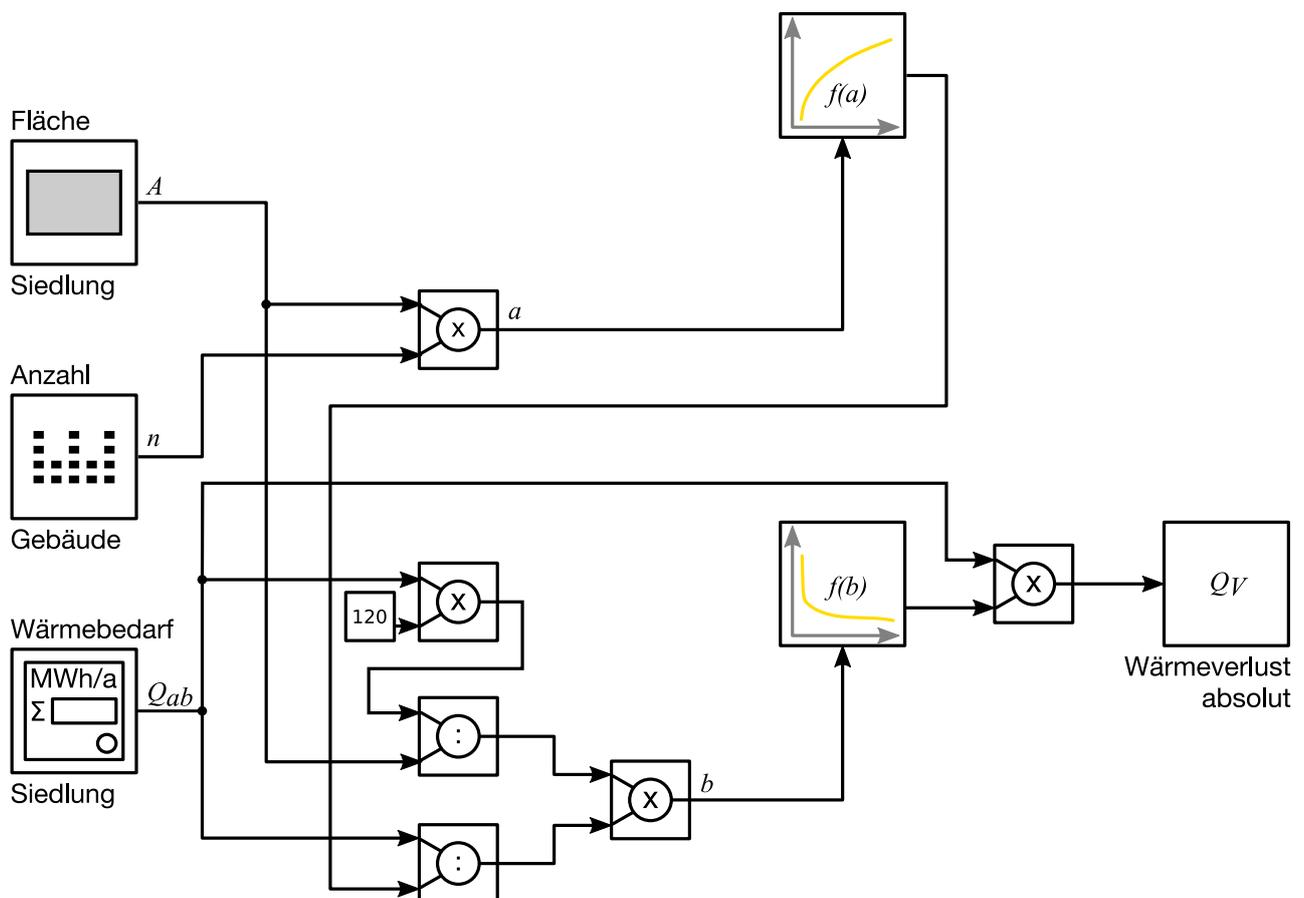


Nahwärmenetze

Entwicklung eines heuristischen Verfahrens zur Prognose von Nahwärmenetzverlusten mit statistischen Methoden

Dipl.-Ing. (FH) Robert Alfred Fröhler, M.Eng.



Nahwärmenetze

Entwicklung eines heuristischen Verfahrens zur Prognose von Nahwärmenetzverlusten mit statistischen Methoden

Dipl.-Ing. (FH) Robert Alfred Fröhler, M.Eng.

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design
der Technischen Universität München zur Erlangung des
akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Thomas Auer

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Hausladen
2. Prof. Dr. Thomas Hamacher

Die Dissertation wurde am 21.06.2021 bei der
Technischen Universität München eingereicht und durch
die TUM School of Engineering and Design am 25.04.2022 angenommen.

Kurzfassung

Wärmenetze sind ein wichtiger Baustein in der Transformation unserer Energiesysteme und finden zunehmend Berücksichtigung in städtebaulichen Wettbewerben. Die grobe Granularität der energetischen Daten in dieser Wettbewerbsphase verhindert jedoch umfangreiche Wärmenetzberechnungen. Deshalb wird in dieser Dissertation ein Verfahren entwickelt, welches auf Basis der in frühen Planungsphasen verfügbaren Daten, Aussagen zur Effizienz potenzieller zentraler Wärmeversorgungskonzepte ermöglicht. Der daraus hervorgehende Algorithmus nutzt lediglich die drei Kennwerte: Quartierfläche, Anzahl Gebäudeteile und Gesamtwärmebedarf. Optional können durch die zusätzliche Eingabe der Vor- und Rücklauftemperaturen Wärmeverluste von Netzen mit niedrigen Systemtemperaturen ermittelt werden. Die Entwicklung und Validierung der einzelnen Algorithmusteile basiert auf Daten, welche aus der Simulation synthetischer und realer Wärmenetzprojekte entstehen. Hierzu wird im Rahmen der Dissertation eine Simulationssoftware entwickelt, die mittels GIS-Layern und Klimadaten Wärmenetze berechnet. Abschließend wird untersucht, wie gut unterschiedliche Wärmeversorgungskonzepte in verschiedenen Quartieren funktionieren. Hierzu werden drei städtische Quartiere aus Bebauungsplänen der Stadt München verwendet. Diese bilden das Spektrum von einer reinen Reihenhaussiedlung bis hin zu einem Quartier dichter Bebauung und Mischung ab.

Abstract

Heating networks are an important component in the transformation of our energy systems and are increasingly being taken into account in urban planning competitions. The coarse granularity of the energetic data in this competition phase prevents extensive heating network calculations. Therefore, in this dissertation a method is developed, which allows statements on the efficiency of potential central heating supply concepts based on the data available in early planning phases. The resulting algorithm only uses the three parameters: quarter area, number of building parts and total heat demand. Optionally, heat losses of networks with low system temperatures can be determined by additionally entering the supply and return temperatures. The development and validation of the individual parts of the algorithm is based on data resulting from the simulation of synthetic and real heating network projects. For this purpose, a simulation software is developed as a part of the thesis, which calculates heating networks using GIS layers and climate data. Finally, it will be analysed how well different heating supply concepts work in different quarters. Therefore, three urban quarters from development plans of the city of Munich are used. These represent the spectrum from a estate of terraced houses to a quarter of high building density and mixed use.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes	IV
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Aktueller Stand der Forschung	4
1.2.1 Wärmebedarf	4
1.2.2 Wärmenetzberechnung	8
1.2.3 Kennwerte in der Wärmenetzentwicklung	9
1.3 Zielsetzung und Forschungsfrage	11
1.4 Methodik	11
1.5 Aufbau der Arbeit	12
2 Entwicklung Simulationssoftware	13
2.1 Methodik der Simulationssoftware	13
2.1.1 Übersicht	13
2.1.2 Energiebedarf	16
2.1.3 Lastprofilverfahren	18
2.1.4 Klimadaten	24
2.1.5 Geoinformationssysteme	27
2.1.6 Mathematische Modelle	30
2.1.7 Rohrdaten	35
2.2 Anwendung der Simulationssoftware rfWärme	41
2.2.1 Initialisierung	41
2.2.2 Dimensionierung	45
2.2.3 Berechnung	48
2.2.4 Grafische Auswertung	52
2.2.5 Simulation	54
2.3 Validierung der Simulationssoftware rfWärme	56
2.3.1 Abnehmer und Zentrale	56
2.3.2 Netztrasse	57
2.3.3 Klimadaten	58
2.3.4 Netztemperaturen	59
2.3.5 Auswertung	59
3 Algorithmus zur Bestimmung des Wärmeverlustes	61
3.1 Übersicht	61
3.2 Modellbildung synthetische Siedlung	62
3.2.1 Gebäudemodell	62
3.2.2 Grundstücksmodell	62
3.2.3 Siedlungsmodell	63

3.2.4	Variationen	63
3.2.5	Korrelationsanalyse Siedlungen	65
3.2.6	Regressionsanalyse Siedlungen.....	69
3.2.7	Validierung des Verfahrens zur Netzlängenberechnung	74
3.2.8	Vergleich des Verfahrens mit einfachen Methoden	77
3.3	Modellbildung synthetische Wärmenetze	82
3.3.1	Wärmenetzmodell	83
3.3.2	Variationen	83
3.3.3	Simulation Wärmenetze	84
3.3.4	Definition Wärmenetzverluste	85
3.3.5	Korrelationsanalyse Wärmenetze	87
3.3.6	Regressionsanalyse Wärmenetze	88
3.3.7	Vergleich des Verfahrens mit einfachen Methoden	94
3.4	Resultierender Algorithmus	97
3.4.1	Validierung des resultierenden Verfahrens	98
3.4.2	Vergleich des Verfahrens mit einfachen Methoden	106
3.4.3	Erweiterung um die Anpassung der Netztemperaturen	106
4	Anwendung in der Quartiersentwicklung	112
4.1	Quartiere	112
4.1.1	Auswahlprozess	112
4.1.2	Beschreibung	112
4.1.3	Energiekennwerte	115
4.2	Wärmeversorgungskonzepte	118
4.2.1	Zentrales Biomethan BHKW 90/60	118
4.2.2	Zentrale Sole/Wasser Wärmepumpe 60/30.....	120
4.2.3	Niedrigtemperaturnetz nach Heissler et al.	121
4.2.4	Luft-Wasser-Wärmepumpen dezentral	123
4.2.5	Fernwärme Stadtwerke München	125
4.2.6	Wärmenetzvarianten.....	125
4.3	Simulationen	130
4.3.1	Parameter	130
4.3.2	Ergebnisse Netzverluste.....	130
4.4	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	132
4.4.1	Verfahren	132
4.4.2	Variablen	132
4.4.3	Ergebnisse	134
4.5	Emissionsanalyse	137
4.5.1	CO ₂ -Äquivalente	137
4.5.2	Ergebnisse Emissionsanalyse.....	139
4.6	Anwendung Algorithmus.....	139
5	Zusammenfassung und Ausblick	141
	Literatur.....	145

Anhang	162
A Python Code	163
B Karten der Testprojekte aus Osnabrück	167
C Karte des Projektes Ehemalige Prinz-Eugen-Kaserne in München	196

Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes

Abkürzungen

BGW	Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft	19
BHKW	Blockheizkraftwerk	118
CAD	Computer-Aided Design	27
CARMEN	Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk	2
CSV	Comma-Separated Values bzw. Character-Separated Values	14
DWD	Deutscher Wetterdienst	VIII
EFH	Einfamilienhaus	17
ENP	Energienutzungsplan	4
ESRI	Environmental Systems Research Institute, Inc.	27
FfE	Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH	23
GF	Geschossfläche als Höchstmaß	115
GIS	Geoinformationssystem	5
GMH	großes Mehrfamilienhaus ab 13 Wohneinheiten	17
HEGT	Historisch-Energetische Gebäudetypologie	4
HH	Hochhaus	17
IQR	Interquartilsabstand bzw. interquartile range	78
IWU	Institut Wohnen und Umwelt GmbH	3
KBS	Koordinatenbezugssystem bzw. Koordinatenreferenzsystem	53
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau	3
MFH	Mehrfamilienhaus bis 12 Wohneinheiten	17
MIF	MapInfo Interchange Format	28
MUC	Flughafen München „Franz Josef Strauß“	3
OIB	Österreichisches Institut für Bautechnik	5
OSM	Openstreetmap	167
RH	Reihenhaus	17
SLP	Standardlastprofil	23
STEFaN	Software zur Trassen-Erschließung Fernwärme für allg. freie Nutzung	9
WB	Wohnblock	117
WF	Wohnfläche	10
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik	26

Formelzeichen griechisch

Größe	Bedeutung	Dimension
α	Zuschlagsfaktor Formstücke (Druckverlustberechnung)	[%]
α	Wärmeübergangskoeffizient (Wärmeberechnung)	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$
ζ	Druckverlustbeiwert	[-]
ϑ	Temperatur	[°C]
ϑ_{mid}	jährliche mittlere Erdoberflächentemperatur	[°C]
ϑ_{amp}	Amplitude der Erdoberflächentemperatur	[K]
$\vartheta_{U(z,t)}$	Erdoberflächentemperatur in der Tiefe z zum Zeitpunkt t	[°C]
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$
π	Kreiszahl	[-]
ρ	Dichte	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$
Δp	Druckverlust	[Pa]
ΔT	Temperaturdifferenz	[K]

Formelzeichen lateinisch

Größe	Bedeutung	Dimension
a	Temperaturleitfähigkeit des Erdreichs	$\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right]$
k	Rauheit	[mm]
k_A	flächenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}\right]$
k_L	längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}\right]$
\dot{m}	Massenstrom	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
n	Anzahl Gebäude	
t	betrachteter Zeitpunkt	[d]
t_0	Periode der Sinusfunktion (hier 1 Jahr)	[d]
w	Geschwindigkeit	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$
z	Tiefe im Erdreich	[m]
A	Fläche	$[\text{m}^2]$
A, B, C, D'	Lastprofilparameter	[-]
D	Durchmesser	[m]
G	geothermischer Gradient	$\left[\frac{\text{K}}{\text{m}}\right]$
KW	Kundenwert	$\left[\frac{\text{kWh}}{\text{d}}\right]$
L	Länge	[m]
\dot{Q}	Wärmeleistung	[W]
R	Radius	[m]
Re	Reynoldszahl	[-]
U	Umfang	[m]
V	Volumen	$[\text{m}^3]$

Indizes

Indizes	Bedeutung
<i>a</i>	außen
<i>i</i>	innen
<i>A</i>	Fläche
<i>D</i>	Dämmung
<i>EB</i>	Energiebezug
<i>GE</i>	Geschoss
<i>GR</i>	Grund
<i>L</i>	Länge
<i>R</i>	Rohr
<i>RE</i>	Rücklauf zu Erdreich
<i>RL</i>	Rücklauf
<i>U</i>	Umgebung
<i>VE</i>	Vorlauf zu Erdreich
<i>VL</i>	Vorlauf

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Netzverluste von Nahwärmenetzen aus den Jahren 2011 bis 2015	2
Abbildung 2	Verteilverluste in Abhängigkeit der Wärmebedarfsdichte	3
Abbildung 3	Gegenüberstellung Siedlungstypologien Teil 1	7
Abbildung 4	Gegenüberstellung Siedlungstypologien Teil 2	8
Abbildung 5	Funktionsschema des Programms rfWärme	13
Abbildung 6	Berechnung der Massenströme im Netz	15
Abbildung 7	Berechnung der Vorlauftemperaturen im Netz	15
Abbildung 8	Berechnung der Rücklauftemperaturen im Netz	15
Abbildung 9	Ermittlung der Gebäudegrundfläche in GIS	16
Abbildung 10	Berechnung der Energiebezugsfläche in GIS	16
Abbildung 11	Berechnung der stündlichen Wärmemenge Q_{Std}	20
Abbildung 12	Temperaturabhängigkeit innerhalb des Lastprofiltyps GKO	20
Abbildung 13	Temperatur-Regressionskurven Lastprofile Gas	21
Abbildung 14	Wochentagsfaktoren F der einzelnen Lastprofile	22
Abbildung 15	Sigmoidfunktion mit Linearisierungsanteilen (SigLinDe)	24
Abbildung 16	Beispieldatei Deutscher Wetterdienst (DWD) Klimadaten im Zip-Format ..	25
Abbildung 17	Schematische Darstellung der Heizgradtage G_{15}	25
Abbildung 18	Struktur der Klimadateien in rfWärme	26
Abbildung 19	GIS Flächenlayer bestehend aus Geometrie und Datenbank	27
Abbildung 20	GIS Linienlayer bestehend aus Geometrie und Datenbank	27
Abbildung 21	GIS Punktlayer bestehend aus Geometrie und Datenbank	28
Abbildung 22	Punktlayer im MIF Format; .mif: Geometriedatei, .mid: Attributdatei	29
Abbildung 23	Schwerpunkte aus den Gebäudegrundflächen	29
Abbildung 24	Netztrasse als Linienlayer	29
Abbildung 25	Punktlayer Abnehmer, Linienlayer Netztrasse, Punktlayer Wärmequelle...	30
Abbildung 26	Objektnummerierung im Layer rfNetzTrasse	30
Abbildung 27	Objektnummerierung im Layer rfPunkte	30
Abbildung 28	Berechnung der Vorlauftemperaturen am Knoten	32
Abbildung 29	Berechnung der Rücklauftemperaturen am Knoten	32
Abbildung 30	Darstellung Temperaturabfall Wärmeträgermedium in einem Rohr	33

Abbildung 31	Tagesmittelwerte Augsburg 01.01.1951 - 31.12.2016	35
Abbildung 32	Darstellung der unterschiedlichen Rohrdurchmesser in Tabelle 10	36
Abbildung 33	Lineare Regressionen zur Bestimmung der Baukosten ab DN200.....	38
Abbildung 34	Kosten von Wärmenetzen, unbefestigte Oberflächen DN20 - DN80	39
Abbildung 35	Kosten von Wärmenetzen, unbefestigte Oberflächen DN100 - DN300.....	39
Abbildung 36	Kosten von Wärmenetzen, asphaltierte Oberflächen DN20 - DN80	40
Abbildung 37	Kosten von Wärmenetzen, asphaltierte Oberflächen DN100 - DN300	40
Abbildung 38	Anlegen eines neuen Projektes in rfWärme.....	41
Abbildung 39	Anlegen eines neuen Projektes in rfWärme.....	41
Abbildung 40	Importieren des Layers Einspeiser	42
Abbildung 41	Importieren des Layers Abnehmer	42
Abbildung 42	Zuordnung der Attribute des Layers Abnehmer.....	42
Abbildung 43	Importieren des Layers Netztrasse.....	43
Abbildung 44	Konvertierung einer MapInfo Datei zu rfWärme.....	43
Abbildung 45	Download Klimadaten vom FTP-Server des DWD.....	43
Abbildung 46	Auswahl der Station des DWD	44
Abbildung 47	Auswahl der Klimadateien.....	44
Abbildung 48	Auswahl der Heizgradtage nach VDI 3807	44
Abbildung 49	Laden der Rohrtabelle und des Lastprofils	45
Abbildung 50	Wahl des Menüpunktes Dimensionieren	45
Abbildung 51	Wahl der Außentemperatur zur Auslegung des Wärmenetzes	45
Abbildung 52	Temperaturdifferenz zur Auslegung des Wärmenetzes	46
Abbildung 53	Maximaler Druckverlust im Rohr in Pa/m.....	46
Abbildung 54	Typische Druckverlustwerte zur Netzdimensionierung	47
Abbildung 55	Anschlussgrad der vorhandenen Gebäude 100%.....	48
Abbildung 56	Anschlussgrad der vorhandenen Gebäude 50%	48
Abbildung 57	Wahl des Menüpunktes Berechnung	49
Abbildung 58	Wahl der Vorlauftemperatur am Wärmeerzeuger.....	49
Abbildung 59	Wahl der mindestens erforderlichen Vorlauftemperatur am Verbraucher...	49
Abbildung 60	Wahl der kleinstmöglichen Rücklauftemperatur am Verbraucher	49
Abbildung 61	Toleranzparameter der iterativen Berechnung.....	50
Abbildung 62	Vergleich Wärmeverluste unterschiedlicher Dämmklassen	50

Abbildung 63	Wahl der Dämmklasse des Leitungsnetzes	50
Abbildung 64	Einstellungen zur Druckverlustberechnung.....	51
Abbildung 65	Gesamtwirkungsgrad der Netzpumpe.....	51
Abbildung 66	Typische Gesamtwirkungsgrade von Netzpumpen	51
Abbildung 67	Wahl der Berechnungstunde	51
Abbildung 68	Darstellung der Berechnungsergebnisse.....	52
Abbildung 69	Wahl des Menüpunktes Berechnung	53
Abbildung 70	Erzeugen einer Legende des Layers rfNetzTrasse in QGIS	53
Abbildung 71	Erzeugen einer Legende des Layers rfPunkte in QGIS	54
Abbildung 72	Einfärben der Vorlauf- und Rücklauftemperaturen im Layer rfNetztrasse ..	54
Abbildung 73	Einfärben der Vorlauf- und Rücklauftemperaturen im Layer rfPunkte	55
Abbildung 74	Wahl des Menüpunktes Simulation.....	55
Abbildung 75	Starten einer Simulation	56
Abbildung 76	Trassenplan Neueckerode.....	58
Abbildung 77	Distanz DWD Messstation 662 und Neueckerode	58
Abbildung 78	Netztemperaturen Nahwärme Neueckerode	59
Abbildung 79	Wärmebilanz Nahwärme Neueckerode.....	60
Abbildung 80	Schematische Darstellung des Algorithmus	61
Abbildung 81	Typisches Einfamilienhaus als Gebäude der synthetischen Siedlung	62
Abbildung 82	Entwicklung des Standardgrundstücks der synthetischen Siedlung	62
Abbildung 83	Standardvariante der synthetischen Siedlung	63
Abbildung 84	Variation der Dichte in der synthetischen Siedlung	64
Abbildung 85	Variation der Anzahl in der synthetischen Siedlung	65
Abbildung 86	Berechnungsgrundlage zur Variation der synthetischen Siedlung.....	66
Abbildung 87	Streudiagramm Siedlungsfläche · Anzahl Gebäude und Netzlänge	67
Abbildung 88	Streudiagramm aus Rängen $rg(x_i)$ und $rg(y_i)$	68
Abbildung 89	Lineare Regressionsfunktion	70
Abbildung 90	Regression Länge Wärmenetz mit linearer Funktion.....	71
Abbildung 91	Regression Länge Wärmenetz mit Polynomfunktion.....	71
Abbildung 92	Regression Länge Wärmenetz mit Wurzelfunktion	72
Abbildung 93	Regression Länge Wärmenetz mit natürlichem Logarithmus	73
Abbildung 94	Regression Länge Wärmenetz mit zusammengesetzter Funktion	73

Abbildung 95	Grundstück mit sehr dichter Bebauung nach Everding	74
Abbildung 96	Synthetische Siedlung mit sehr dichter Bebauung	74
Abbildung 97	Grundstück mit extra großer Breite	75
Abbildung 98	Synthetische Siedlung mit extra breiten Grundstücken	75
Abbildung 99	Netzlängenabweichungen aus Tabellen 18 und 19	77
Abbildung 100	Vergleich der drei Verfahren zur Netzlängenberechnung	81
Abbildung 101	Wärmenetzmodell Faktoren f_A und $n=[12,16,20]$	83
Abbildung 102	Wärmenetzmodell Faktor x	84
Abbildung 103	Streudiagramm aus spezifischen Netzverlusten	88
Abbildung 104	Streudiagramm aus Rängen $rg(x_i)$ und $rg(y_i)$	89
Abbildung 105	Regression Netzverluste mit linearer Funktion	89
Abbildung 106	Regression Netzverluste mit Polynomfunktion	90
Abbildung 107	Regression Netzverluste mit natürlichem Logarithmus	90
Abbildung 108	Regression Netzverluste mit Kotangens hyperbolicus	91
Abbildung 109	Regression Netzverluste mit kombinierter Funktion vor Optimierung	92
Abbildung 110	Optimierung der Standardabweichung durch Faktor i	93
Abbildung 111	Regression Netzverluste mit kombinierter Funktion nach Optimierung	93
Abbildung 112	Regression Netzverluste aus unterschiedlichen Quellen	94
Abbildung 113	Differenz simulierter und berechneter Netzverluste	95
Abbildung 114	Regression Netzverluste mit logarithmischer Regression	95
Abbildung 115	Näherungsfunktion der Gleichzeitigkeit in Wärmenetzen	96
Abbildung 116	Differenz simulierter und berechneter Netzverluste	97
Abbildung 117	Endgültiger Algorithmus mit den beiden Funktionen $f(a)$ und $f(b)$	97
Abbildung 118	Wärmenetzmodell Faktoren f_A und $n=[14,18]$	98
Abbildung 119	Vergleich simulierter und berechneter absoluter Netzverluste $n=[14,18]$	99
Abbildung 120	Differenz simulierter und berechneter Netzverluste $n=[14,18]$	99
Abbildung 121	Vergleich simulierter und berechneter Netzverluste $n=[12,14,16,18,20]$	100
Abbildung 122	Differenz simulierter und berechneter Netzverluste $n=[12,14,16,18,20]$	101
Abbildung 123	Differenz originaler und berechneter Netzverluste Projekte Wohnnutzung	104
Abbildung 124	Differenz originaler und berechneter Netzverluste Projekte alle Arten	105
Abbildung 125	Vergleich der Längenabweichungen	106
Abbildung 126	Differenz originaler und berechneter Netzverluste	107

Abbildung 127	Entwicklung des Divisors zur Netztemperaturanpassung	109
Abbildung 128	Quotient Netzverluste Variante1	110
Abbildung 129	Quotient Netzverluste Variante2	111
Abbildung 130	Lage der gewählten Bebauungspläne in München	112
Abbildung 131	Bebauungsplan Nr. 1890 München.....	113
Abbildung 132	Bebauungsplan Nr. 1971 München.....	114
Abbildung 133	Bebauungsplan Nr. 1987 München.....	115
Abbildung 134	Übersicht Konzept Biomethan BHKW Wärmenetz 90/60.....	118
Abbildung 135	Preiskurve indirekte Fernwärmestation	119
Abbildung 136	Übersicht Konzept Solewärmepumpe Wärmnetz 60/30.....	120
Abbildung 137	Preiskurve Sole/Wasser Wärmepumpe.....	121
Abbildung 138	Übersicht Konzept Niedrigtemperaturnetz 18,2.....	121
Abbildung 139	Übersicht Konzept Luft-Wasser-Wärmepumpen.....	123
Abbildung 140	Preiskurve Luft-Wasser-Wärmepumpe	124
Abbildung 141	Übersicht Konzept Fernwärme Stadtwerke München.....	125
Abbildung 142	Trassenverlaufvarianten BP1890	126
Abbildung 143	Trassenverlaufvarianten BP1971	128
Abbildung 144	Trassenverlaufvarianten BP1987	129
Abbildung 145	Auswertung der Netzverluste.....	131
Abbildung 146	Preisentwicklung gewerbliche Erzeugnisse, Strom und Fernwärme	133
Abbildung 147	Preisentwicklung Biomethan	133
Abbildung 148	Preisentwicklung Dienstleistungen	134
Abbildung 149	Auswertung der Wirtschaftlichkeit	135
Abbildung 150	Darstellung Wärmepreise auf Basis von Netzverlusten	136
Abbildung 151	Auswertung der Netzverluste auf Netzlänge bezogen	137
Abbildung 152	Auswertung der Netzverluste auf Quartierfläche bezogen	137
Abbildung 153	Darstellung der CO ₂ -Äquivalente	138
Abbildung 154	Vergleich Netzverluste Algorithmus versus Simulation	140
Abbildung 155	Flächenermittlung Osnabrück Zum Himmelreich.....	167
Abbildung 156	Flächenermittlung Osnabrück Rheiner Landstraße.....	168
Abbildung 157	Flächenermittlung Osnabrück Portweg	169
Abbildung 158	Flächenermittlung Osnabrück Preußenweg.....	170

Abbildung 159	Flächenermittlung Osnabrück Bramkamp	171
Abbildung 160	Flächenermittlung Osnabrück Fürstenauer Weg	172
Abbildung 161	Flächenermittlung Osnabrück Pyer Kirchweg	173
Abbildung 162	Flächenermittlung Osnabrück Gretescher Weg	174
Abbildung 163	Flächenermittlung Osnabrück Strothmannsweg	175
Abbildung 164	Flächenermittlung Osnabrück Hauptmannstraße	176
Abbildung 165	Flächenermittlung Osnabrück Schledehauser Weg	177
Abbildung 166	Flächenermittlung Osnabrück Sandforter Straße.....	178
Abbildung 167	Flächenermittlung Osnabrück Kreuzhügel.....	179
Abbildung 168	Flächenermittlung Osnabrück Ansgarstraße	180
Abbildung 169	Flächenermittlung Osnabrück Auf der Heide	181
Abbildung 170	Flächenermittlung Osnabrück Wersener Landstraße	182
Abbildung 171	Flächenermittlung Osnabrück Hannoversche Straße	183
Abbildung 172	Flächenermittlung Osnabrück Hasestraße	184
Abbildung 173	Flächenermittlung Osnabrück Freiheitsweg	185
Abbildung 174	Flächenermittlung Osnabrück Goethering	186
Abbildung 175	Flächenermittlung Osnabrück Süsterstraße.....	187
Abbildung 176	Flächenermittlung Osnabrück Bohmter Straße	188
Abbildung 177	Flächenermittlung Osnabrück Atterstraße	189
Abbildung 178	Flächenermittlung Osnabrück Bucholtzstraße.....	190
Abbildung 179	Flächenermittlung Osnabrück Piesberger Straße	191
Abbildung 180	Flächenermittlung Osnabrück Klöcknerstraße.....	192
Abbildung 181	Flächenermittlung Osnabrück Pagenstecherstraße	193
Abbildung 182	Flächenermittlung Osnabrück Elbestraße	194
Abbildung 183	Flächenermittlung Osnabrück Rheinstraße.....	195
Abbildung 184	Flächenermittlung München Cosimastraße	196

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Brutto-Nutzenergiebedarf für unsanierte Wohngebäude in kWh/(m ² ·a).....	17
Tabelle 2	Brutto-Nutzenergiebedarf für normal sanierte Wohngebäude in kWh/(m ² ·a)...	18
Tabelle 3	Kategorien für Standardlastprofile.....	19
Tabelle 4	Wochentagsfaktoren F für den Lastprofiltyp GKO.....	21
Tabelle 5	Ausschnitt aus: Stundenfaktoren SF für den Lastprofiltyp GKO.....	23
Tabelle 6	Ausschnitt aus Beispiel Klimadatei München-Flughafen.....	25
Tabelle 7	Ausschnitt aus dem Datensatz rfNetzTrasse.....	31
Tabelle 8	Ausschnitt aus dem Datensatz rfPunkte.....	31
Tabelle 9	Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit der Reynoldszahl.....	33
Tabelle 10	Dimensionen starrer Kunststoffmantelrohre (KMR).....	36
Tabelle 11	Dimensionen flexibler vernetzter Polyethylen Rohre (PE-Xa).....	37
Tabelle 12	längenbezogener Druckverlust in Pa/m für KMR Rohre.....	47
Tabelle 13	Vergleich Siedlungstypologie mit synthetischem Siedlungsmodell.....	66
Tabelle 14	Auszug Datentabelle Siedlungsfläche · Anzahl Gebäude und Rang.....	67
Tabelle 15	Auszug Datentabelle Wärmenetzlänge und Rang.....	67
Tabelle 16	Bildung von Durchschnittsrängen.....	67
Tabelle 17	Berechnung Netzlänge extreme synthetische Siedlungen.....	75
Tabelle 18	Auswertung Projekte Osnabrück Teil 1.....	77
Tabelle 19	Auswertung Projekte Osnabrück Teil 2.....	78
Tabelle 20	Berechnung mit 43 m ² /trm Osnabrück Teil 1.....	79
Tabelle 21	Berechnung mit 43 m ² /trm Osnabrück Teil 2.....	80
Tabelle 22	Netzwärmeverlust und spezifische Netzlänge.....	80
Tabelle 23	Berechnung mit trm/WE Osnabrück Teil 1.....	81
Tabelle 24	Berechnung mit trm/WE Osnabrück Teil 2.....	82
Tabelle 25	Materialien und Temperaturen in Wärmenetzen < 10.000 MWh/a.....	86
Tabelle 26	Materialien und Temperaturen in Wärmenetzen 10.000 - 100.000 MWh/a.....	87
Tabelle 27	Materialien und Temperaturen in Wärmenetzen > 100.000 MWh/a.....	87
Tabelle 28	Analyse der Ausreißer der Validierung n = [14, 18].....	100
Tabelle 29	Analyse der Ausreißer der Validierung n = [12, 14, 16, 18, 20].....	101
Tabelle 30	Validierung mit realen Wärmenetzen.....	102

Tabelle 31	Validierung Netzlängenberechnung anhand realer Wärmenetze	107
Tabelle 32	Validierung Temperaturanpassung anhand Cosimastraße Variante 1	110
Tabelle 33	Validierung Temperaturanpassung anhand Cosimastraße Variante 2.....	111
Tabelle 34	Wärmebedarfskennwerte in kWh/m ² a (GF) Wohngebäude	116
Tabelle 35	Wärmebedarfskennwerte in kWh/m ² a (GF) Nichtwohngebäude	117
Tabelle 36	Vollbenutzungsstunden in h/a für unterschiedliche Gebäudearten.....	117
Tabelle 37	Wärmeabnahmedichten im Quartier BP1890	126
Tabelle 38	Wärmeabnahmedichten im Quartier BP1971	127
Tabelle 39	Wärmeabnahmedichten im Quartier BP1987	130

1. Einleitung

Die größte Herausforderung besteht im Augenblick darin, den von Menschen verursachten Klimawandel zu bremsen. Ein wichtiger Schlüssel hierzu liegt in der Reduktion von Treibhausgasen bei der Energieversorgung. In Deutschland gibt es diesbezüglich im Augenblick für den Gebäudebereich zwei erkennbare Strategien [1].

Zum einen wird durch die immer strengeren Anforderungen der Energieeinsparverordnung der zulässige Gebäudeenergiebedarf reduziert. Zum anderen führt die stetige Senkung des zulässigen Primärenergiebedarfs zur Steigerung des Anteils an regenerativen Energieträgern. Gerade im Bereich der energetischen Biomassennutzung kann auf Grund der begrenzten lokalen Ressourcen ein nachhaltiger Ausbau in Zukunft nur noch über die Steigerung der Effizienz führen. Die in Biomasse gespeicherte Sonnenenergie ist exergetisch als sehr hochwertig einzustufen. Eine reine Nutzung zur Gebäudebeheizung erscheint aus exergetischen Sicht als nicht sinnvoll. Besser wäre eine primäre Nutzung der Biomasse zur Stromproduktion mit sekundärer Abwärmenutzung. Konstruktiv bedingt sind Biomasseanlagen zur Stromproduktion nicht beliebig klein realisierbar, so dass eine Wärmenutzung häufig nur in Verbindung mit einem zentralen Wärmenetz erfolgen kann. Hier gibt es unterschiedliche Zielkonflikte. Auf der einen Seite beeinträchtigt die immer weiter abnehmende Wärmedichte durch Gebäudesanierung und energetisch hochwertiger Neubauten die Wirtschaftlichkeit von Nahwärmenetzen. Auf der anderen Seite gibt es neue Entwicklungen in Richtung „Kalter Nahwärme“ bzw. Niedrigtemperaturnetzen um durch den geringen Tempertaurunterschied von Heizwasser zur Erdreichtemperatur die Verluste zu minimieren. Im Abschlussbericht „Potenziale von Niedrigtemperaturnetzen zur Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien in Quartieren“ von Heissler et al. wurde ein solches Niedrigtemperaturnetz detailliert anhand von acht Szenarien untersucht [2].

Die Entwicklung eines Nahwärmenetzprojektes ist eine vielschichtige Aufgabenstellung - vergleichbar mit der architektonischen Aufgabe, ein Gebäude zu entwickeln. In der Architektur wird im Entwurf häufig eine heuristische Methode zur Lösungsfindung gewählt. In der Technik setzt man hingegen meistens von Anfang an auf Berechnungen. Ist dafür die Datengrundlage nicht ausreichend, werden Kennwerte aus vergleichbaren Aufgabenstellungen der Vergangenheit verwendet, um so Entwurfsentscheidungen zu treffen. Es zeigt sich in der Praxis, dass häufig die Datengrundlage für eine umfangreiche Berechnung bzw. Simulation nicht ausreicht oder nur sehr aufwändig zu beschaffen ist.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Ziel eines jeden Nahwärmenetzes ist es, die Effizienz zu steigern oder anders nicht erschließbare Wärmequellen zu verwenden. Die Entscheidungsfindung zur Planung eines Nahwärme-

netzes in einem Gebiet durchläuft dabei mehrere Stufen. In einer ersten Stufe werden, wie im Leitfadens Energienutzungsplan [3, S. 15 ff.] beschrieben, Gebiete über ihre Energiedichte gefiltert. In der weiteren Vorgehensweise werden in den Gebieten mit ausreichender Dichte Nahwärmenetze projektiert und über Kennwerte hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Effizienz bewertet. Sind diese Bewertungsergebnisse positiv, wird das Nahwärmenetz anschließend bei ausreichender Nachfrage umgesetzt.

Eine weitere Möglichkeit der Potenzialerhebung von Nah- und Fernwärme wurde vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) im Projekt „Potenzialanalyse zum Aufbau von Wärmenetzen unter Auswertung siedlungsstruktureller Merkmale“ [4] im Jahr 2011 erarbeitet. Hierbei legen Esch et al. den Fokus auf die reine Wirtschaftlichkeit, in dem sie großflächig Wärmedichten und so die Netzkosten ermitteln. Diese Netzkosten führen zu Investitionskosten, woraus sich dann der Potenzialwert (kWh/a)/€ berechnen lässt.

Für eine nachhaltige Wärmeversorgung ist aber zusätzlich die Betrachtung der Wärmeverluste erforderlich. Diese haben sowohl einen Einfluss auf die ökonomische, als auch auf die ökologische Effizienz. Zu hohe Wärmeverluste haben zusätzliche Energiekosten zur Folge. Da nahezu jeder Energieträger einen treibhauswirksamen Anteil enthält, sind unnötige Netzverluste aus ökologischer Sicht zu vermeiden. Im Merkblatt: „Nahwärmenetze und Bioenergieanlagen - Ein Beitrag zur effizienten Wärmenutzung und zum Klimaschutz“ gibt das Netzwerk Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk (CARMEN) als Zielwert für die jährlichen „Netzverluste bezogen auf die zugeführte Wärmemenge bei ganzjähriger Betriebsweise“ einen maximalen Wert von 10% an. Um dies zu erreichen, empfiehlt CARMEN die Wärmebedarfsdichte von 1,5 MWh je Trassenmeter und Jahr nicht zu unterschreiten [5]. Die Netzverluste haben später einen großen Einfluss auf die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit im Betrieb.

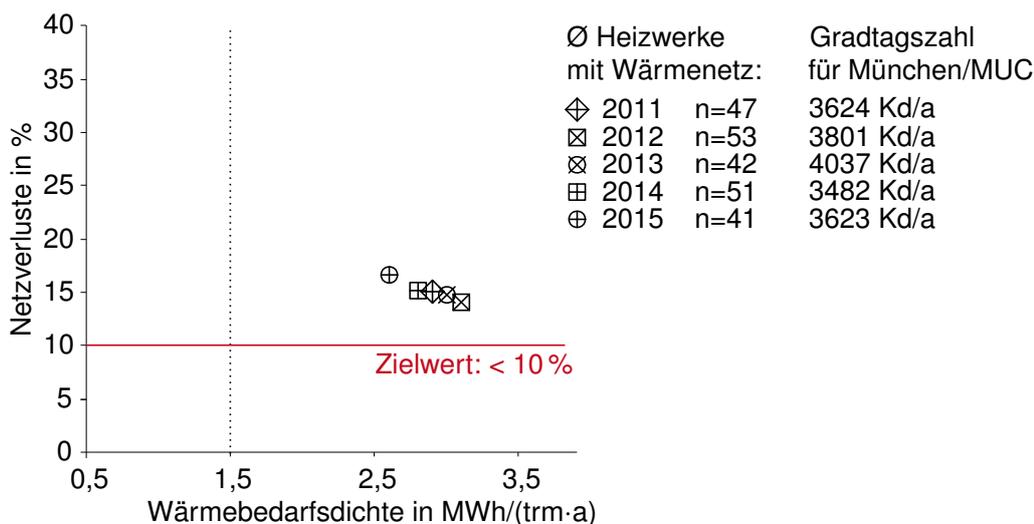


Abbildung 1 Netzverluste von Nahwärmenetzen aus den Jahren 2011 bis 2015 (Quellen: Daten aus [6][7][8][9][10])

In Abbildung 1 wurden die durchschnittlichen Netzverluste von Heizwerken mit Wärmenetz eingetragen. Die Daten stammen aus Auswertungen von Jahresberichten der Jahre 2011

bis 2015 durch Hiendlmeier, und sind von geförderten bayerischen Wärmenetzbetreibern jährlich bei der Bewilligungsstelle, dem Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe in Straubing, einzureichen [6][7][8][9][10]. Die Legende zeigt für jedes Jahr die Anzahl (n) der untersuchten Wärmenetze. In der Praxis ergeben sich hier Netzverluste deutlich oberhalb des Zielwertes von maximal 10 %, obwohl die Wärmebedarfsdichten über 1,5 MWh/(trm·a) liegen. Da die Anzahl der hier untersuchten Netze mit ca. 50 Anlagen über die Jahre hinweg annähernd konstant bleibt, kann man gut den Einfluss der jährlich unterschiedlichen Klimabedingungen auf die Energiedichten erkennen. Die zugehörigen Gradtagszahlen haben als Basis das Klima München/Flughafen München „Franz Josef Strauß“ (MUC). Dies wurden mit dem Exceltool Gradtagszahlen Deutschland¹ des Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) berechnet.

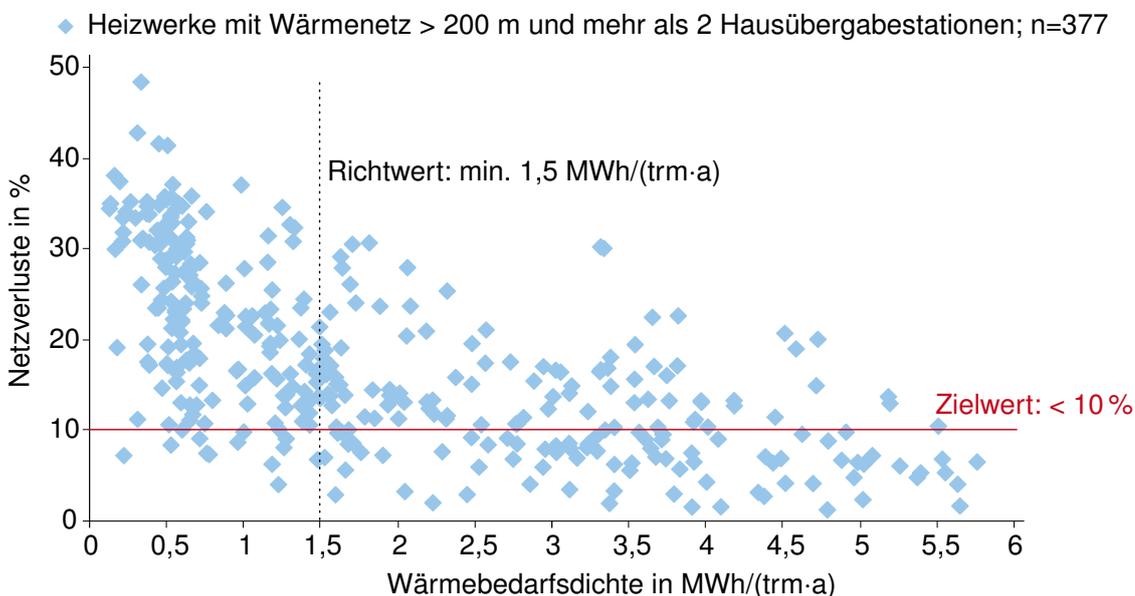


Abbildung 2 Verteilverluste in Abhängigkeit der Wärmebedarfsdichte (Quelle: In Anlehnung an [11, S. 35])

In der Grafik von Pex [11] (Abbildung 2) sind die Verteilverluste von weiteren 377 Nahwärmenetzen dargestellt. Hier wird deutlich, dass allein durch das Einhalten der maximalen Wärmebedarfsdichte nach CARMEN von 1,5 MWh/(trm·a), die 10 % Netzverluste noch nicht garantiert sind. Hier geht zwar der Trend bei hohen Wärmebedarfsdichten zu niedrigeren Netzverlusten, jedoch gibt es auch hier eine hohe Bandbreite von nahe 0 % bis über 30 %.

Die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) setzt in ihrem Merkblatt: „Erneuerbare Energien“ [12] zur Förderung eines Wärmenetzes, welches aus erneuerbaren Energien gespeist wird, einen Mindestwärmeabsatz von 0,5 MWh je Trassenmeter und Jahr voraus. Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, gibt es Wärmenetze, die auch unterhalb dieser Wärmebedarfsdichte weniger als 10 % Netzverluste erreichen.

¹ http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/Gradtagszahlen_Deutschland.xls (aufgerufen am 24.07.2018)

Die aktuell verwendeten Kennwerte weisen gerade im Bereich niedriger Energiedichten eine hohe Unsicherheit auf.

1.2 Aktueller Stand der Forschung

Schon Engelmann und Krimmiling beschreiben in ihrem Artikel „Vorausberechnung der Wärmeverluste von Fernwärmenetzen“ [13] die Schwierigkeiten dieses Unterfangens.

Nach Blesl basiert die Ermittlung von wirtschaftlichen Fernwärmenetzen zum einen auf einer Erhebung der Wärmebedarfsseite, welche über eine der vier Arten (Gebäudedatenmethode, Gebäudetypmethode, Tarifräummethode und Siedlungstypmethode) erfolgen kann [14, S. 9]. Zum anderen werden Wärmenetze hinsichtlich Kosten und Betriebsparameter simuliert [14, S. 71 ff.].

Die Übersicht über den aktuellen Stand der Forschung erfolgt in drei Schritten. Zuerst werden unterschiedliche Methoden zur Ermittlung des Wärmebedarfs gegenübergestellt. Anschließend werden verschiedene Konzepte zur Berechnung von Wärmenetzen behandelt. Im dritten Schritt werden Kennwerte zur Konzeption von Wärmenetzen aufgezeigt.

1.2.1 Wärmebedarf

Die Ermittlung des Wärmebedarfs innerhalb eines Gebietes kann in unterschiedlicher Detaillierung erfolgen. Nach Blesl [14, S. 9] werden vier mögliche Methoden untersucht: **Gebäudedatenmethode, Gebäudetypmethode, Tarifräummethode und Siedlungstypmethode**.

Zur **Gebäudedatenmethode** eignen sich zwei Verfahren: Im ersten werden die Werte des gemessenen Gebäudeenergiebedarfs klimabereinigt. Als Quelle hierzu dienen nach Blesl Energiezähler, Messdaten der Versorger oder auch Daten der Schornsteinfeger. Alternativ kann der Wärmeenergiebedarf auch gemäß dem Verfahren zur Erstellung der Energieausweise berechnet werden [14, S. 12 ff.].

Bei der **Gebäudetypenmethode** werden für jedes Gebäude auf Basis von gebäudetypologischen Kennwerten die jeweiligen Wärmebedarfswerte ermittelt. Die Basis der Gebäudetypologie für Wohngebäude in Deutschland haben Ebel et al. [15] unter dem Titel „Der zukünftige Heizwärmebedarf der Haushalte“ veröffentlicht. Seitdem wurden die Daten dieser Gebäudetypologie immer wieder aktualisiert. Zuletzt wurde sie unter dem Projekt Episcopo von Loga et al. veröffentlicht [16]. Die Werte für die Brutto-Nutzenergie der einzelnen Gebäudetypen sind in den Tabellen 1 und 2 in Abschnitt 2.1.2 dargestellt. Aus den ermittelten spezifischen Kennwerten in $\text{kWh m}^{-2} \text{a}^{-1}$ wird der Bedarfswert für jedes Gebäude berechnet. Hierzu wird exemplarisch für den Bereich Wohngebäude in Abschnitt 2.1.2 das Verfahren aus dem Leitfaden Energienutzungsplan (ENP) [3, S. 21] dargestellt.

Für historische bzw. denkmalgeschützte Gebäude haben Drittenpreis et al. [17] eine Historisch-

Energetische Gebäudetypologie (HEGT) entwickelt. Diese basiert anders als die Gebäudetypologie nach Ebel und Loga nicht auf dem Baujahr der Gebäude, sondern auf Konstruktionsklasse, Geschossanzahl und Anbaugrad. Dieser Systematik ergibt sich aus dem Umstand, dass durch immer wieder erfolgte Um- und Anbauten und Sanierungen allein aus dem Baujahr keine Rückschlüsse auf den Wärmebedarf gezogen werden können. Einzig die Konstruktion sowie die Fläche der Außenwände sind für den Wärmebedarf dieser Gebäudeklasse entscheidend.

Für den Bereich der Nichtwohngebäude hat im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt die ages GmbH im Jahr 2007 unter der Projektnummer 23656-24/2 Verbrauchskennwerte für Nichtwohngebäude gesammelt und ausgewertet [18]. Wie auch in Abschnitt 2.1.2 aufgezeigt, sind Kennwerte für Nichtwohngebäude mit einer großen Unsicherheit verbunden, weshalb in diesem Bereich eine Datenerhebung vor Ort empfohlen wird.

In weiteren Projekten wurden Methoden entwickelt, um den Wärmebedarf für ganze Quartiere berechnen zu können. Mit dem als Plugin der Software QGIS entwickelten Programm GemEB greifen Zadow und Lesser [19] auf die in einer Geoinformationssystem (GIS) Datenbank enthaltenen Gebäudedaten zu. Mit diesen Daten berechnet GemEB in einem Heizperiodenverfahren den Wärmebedarf für jedes in der Datenbank enthaltene Gebäude. Hierbei werden die Geometrien, das Baualter sowie die Kennwerte aus den zuvor aufgeführten Gebäudetypologien verwendet.

Im Projekt CityCalc gehen Smutny et al. [20] einen Schritt weiter und entwickelten eine Software, die als Plugin des 3D-Zeichenprogramms Sketchup funktioniert. Mit dieser können detaillierte Gebäudemodelle erstellt werden, womit CityCalc nach dem Monatsbilanzverfahren der Österreichisches Institut für Bautechnik (OIB) Richtlinie 6 den Wärmebedarf der einzelnen Gebäude berechnet. Durch die genaue Abbildung der opaken Bauteile können hiermit auch die solaren Gewinne präziser als mit GemEB ermittelt werden. Als Nachteil im Vergleich zu GemEB ist die Modellerstellung bei CityCalc zu sehen. Hier ist jedes Gebäude zuerst in Sketchup als 3D Model zu zeichnen, bevor es mit dem Verfahren der OIB Richtlinie 6 berechnet werden kann.

Bei der **Tarifraummethode** werden Daten zu Gebäudeflächen der Stromversorger verwendet [21]. Diese erfassten alle Räume eines Gebäudes mit einer Fläche von mehr 6 m^2 als Grundlage zur Strompreisbildung. Die zugehörige Pflege der Tarifraumdaten durch die Stromversorger wurde laut Saadat [21, S. 25] Ende der 1980er Jahre eingestellt. Deshalb verwirft auch Blesl [14, S. 12] in seiner Arbeit diese Methode.

Eine gute Übersicht über die Entwicklung der **Siedlungstypologien** zeigt Erhorn-Kluttig im Buch „Energetische Quartiersplanung“ [22, S. 32]. Demnach gehen die Grundlagen zurück auf die Pionierarbeit von Roth und Häubi im Jahr 1980 [23]. Diese entwickeln erstmals neun Siedlungstypen für Deutschland und setzen sie in Verbindung mit der Wirtschaftlichkeit von

Fernwärmenetzen.

In seiner Dissertation von 2002 erweitert Blesl [14] die Siedlungstypen von Roth und Häubi [23]. Diese bilden in seiner Arbeit die Quelle zur Wärmebedarfserhebung im großräumigen Bereich. In den Abbildungen 3 und 4 sind beide Typologien gegenüber gestellt, um die Weiterentwicklung durch Blesl aufzuzeigen. Die spezifischen Wärmebedarfswerte stammen von Hausladen und Hamacher aus dem Leitfaden Energienutzungsplan [3, S. 18].

Im Forschungsbericht „Nachhaltiges Bauen und Wohnen in Deutschland“ aus dem Jahr 2004 gliedern Buchert et al. [24] die Siedlungstypen im Wohngebäudebereich nach Geschossflächendichten und unterscheiden hierbei zwischen Ein- und Mehrfamilienhäusern. Eine weitere Typologie entwickelt Everding [25] 2007 im Buch „Solarer Städtebau“. Diese umfasst zwanzig Stadtraumtypen und setzt hierbei den Schwerpunkt auf das Potenzial der Solarenergienutzung.

Im Bereich der Landwirtschaft vergleichen 2007 Gaderer et al. [26] unterschiedliche Abnahmeprozesse von landwirtschaftlichen Biogasanlagen hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit. Besonders die Randbedingungen für Nahwärmenetze sind hierbei ein wichtiges Thema.

Nouvel et al. demonstrieren in ihrem Beitrag „CityGML-based 3D city model for energy diagnostics and urban energy policy support“ [27] aus dem Jahr 2013, wie sich der Wärmebedarf unter Verwendung des offenen Standards CityGML für Quartiere auf Basis einzelner Gebäude berechnen lässt. Eine Validierung mit Quartieren in Ludwigsburg und Karlsruhe zeigt, dass hier Abweichung von 7 % bzw. 21 % entstehen.

Einen anderen Ansatz verfolgen Tardioli et al. in ihrem Artikel aus dem Jahr 2015: „Prediction of building energy use in an urban case study using data driven Approaches“ [28]. Hierin entwickeln sie anhand von statistischen Methoden und künstlichen neuronalen Netzwerken Modelle, mit denen für großräumige Gebiete der Wärmeenergiebedarf ermittelt werden kann.

In ihrem 2016 erschienenen Artikel „A Review of District Heating Systems: Modeling and Optimization“ vergleichen Talebi et al. [29] im Rahmen einer Metastudie unterschiedliche Methoden zur Ermittlung des Wärmebedarfs und des Lastprofils von Gebäuden und Quartieren. Diese umfassen historische, deterministische sowie prädiktive Methoden. Am Ende ihres Artikels zeigen sie eine Übersicht an Studien mit unterschiedlichen Ansätzen zur Bestimmung des Wärmebedarfs. Auf Quartierebene ergibt sich aus den Studien ein Fehlerspannweite von 4 % bis 66 %. Für die einzelnen Gebäude liegt die Spannweite zwischen 1 % und 99 %.

Despotovic et al. [30] beschreiben in ihrem Artikel: „Predicting Heating Energy Demand by Computer Vision“, wie sie Bilder, die Gebäude von außen zeigen, dazu verwenden, einen Algorithmus mit neuronalem Netzwerk zu trainieren, das Baualter und den damit verbundenen

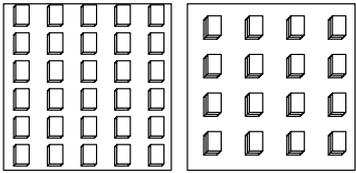
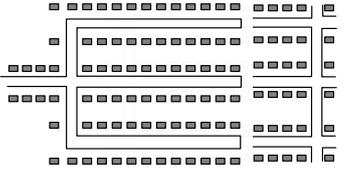
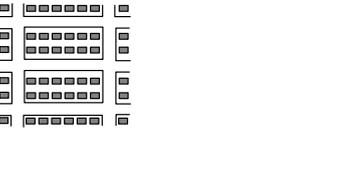
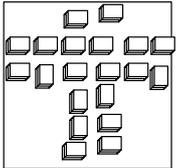
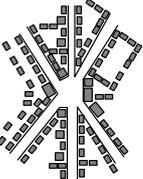
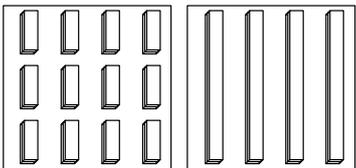
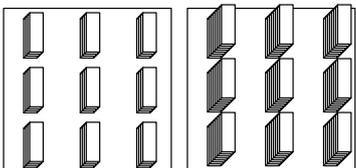
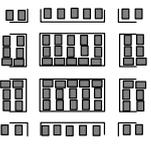
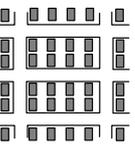
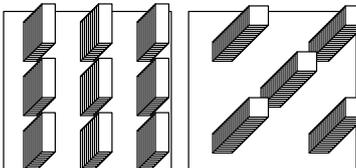
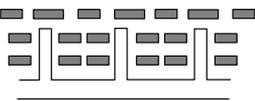
Siedlungstypen nach Roth	Siedlungstypen nach Blesl	
ST1 Ein- und Mehrfamilienhaus- siedlung niedriger Dichte 	ST1 255 MWh/(ha·a) Lockere offene Bebauung (Streusiedlung) 	ST2 456 MWh/(ha·a) Einfamilienhäuser- und Doppelhäuser-Siedlung 
ST2 Dorfkern und Einfamilien- haussiedlung hoher Dichte 	ST3a 525 MWh/(ha·a) städtischer Dorfkern 	ST3b 506 MWh/(ha·a) ländlicher Dorfkern 
ST3 Reihenhaussiedlung 	ST4 425 MWh/(ha·a) Reihenhäuser 	
ST4 Zeilenbebauung mittlerer Dichte 	ST5a 645 MWh/(ha·a) Siedlung kleiner Mehrfamilienhäuser 	ST5b 785 MWh/(ha·a) Zeilenbebauung mit kleinen/ großen Mehrfamilienhäuser 
ST5 Zeilenbebauung hoher Dichte und Hochhäuser 	ST6 1.013 MWh/(ha·a) Zeilenbebauung mit großen Mehrfamilienhäuser oder Hochhäuser 	

Abbildung 3 Gegenüberstellung Siedlungstypologien Teil 1 (Quellen: in Anlehnungen an [23, S. 679][14, S. 143][3, S. 18])

Heizwärmebedarf der Gebäude zu schätzen. Dieser Ansatz kann zukünftig eine Methode der Erhebung von Gebäuden in Bestandsgebieten darstellen.

Siedlungstypen nach Roth

Siedlungstypen nach Blesl

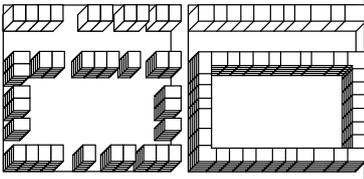
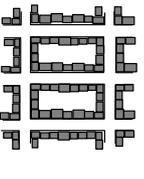
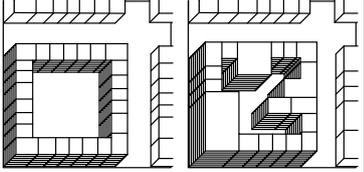
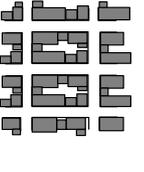
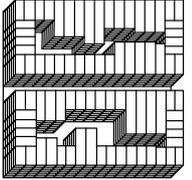
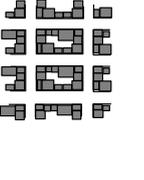
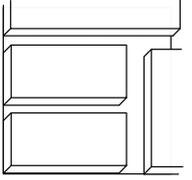
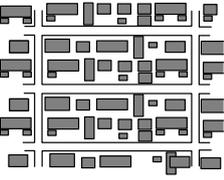
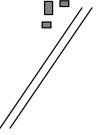
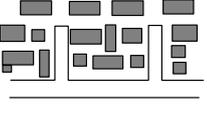
<p>ST6 Blockbebauung</p> 	<p>ST7a 1.043 MWh/(ha·a) Blockbebauung niedriger Dichte</p> 	<p>ST7b 1.065 MWh/(ha·a) Blockbebauung hoher Dichte</p> 
<p>ST7 Citybebauung ab Mitte 19. Jahrhundert</p> 	<p>ST8 1.178 MWh/(ha·a) Citybebauung</p> 	
<p>ST8 Mittelalterliche Stadt</p> 	<p>ST9 1.012 MWh/(ha·a) Historische Altstadt</p> 	
<p>ST9 Industrie- und Lagergebäude</p> 	<p>ST11b 1.253 MWh/(ha·a) Gewerbliche Sonderbauten / Dienstleistungsbauten</p> 	
	<p>ST0 Freistehende Einzelgebäude</p> 	<p>ST10a 1.017 MWh/(ha·a) Öffentliche Sonderbauten (groß)</p> 

Abbildung 4 Gegenüberstellung Siedlungstypologien Teil 2 (Quellen: In Anlehnung an[14, S. 679][23, S. 143][3, S. 18])

1.2.2 Wärmenetzberechnung

Köcher [31] behandelt im Jahr 2000 in seiner Dissertation die mathematischen Grundlagen zur Simulation vermaschter Fernwärmenetze. Hierbei werden sowohl die hydraulischen als auch die thermischen Aspekte berücksichtigt. Am Ende seiner Arbeit beschreibt Köcher Ansätze zur kostenoptimalen Netzauslegung.

In seinem Flächenmodell fasst Blesl [14] zwei Jahre später Gebiete mit gleichartigen Abnehmerstrukturen zu einem Anschlusspunkt zusammen, um die anschließende Netzsimulation für großräumige Gebiete zu vereinfachen. Hierbei wird auf seine zuvor dargestellte Siedlungstypologie zurückgegriffen. Der Trassenverlauf der Wärmenetze orientiert sich an den Straßenverläufen. Über automatische Verlaufsermittlung und Dimensionierung werden die jeweils wirtschaftlichsten Varianten der Versorgung ermittelt.

Die Vorgehensweise einer, nach ökonomischen Kriterien, automatischen Netzkonzeption inklusive Simulation greifen Gnüchtel und Groß [32] 2012 mit ihrer Software zur Trassen-Erschließung Fernwärme für allg. freie Nutzung (STEFaN) auf. Hier werden dem Programm über GIS Layer Wärmeerzeuger, Wärmeabnehmer und ein Straßennetz vorgegeben. Die Software ermittelt selbstständig den optimalen Trassenverlauf bei gleichzeitiger Dimensionierung sowie einer Kostenermittlung des Wärmenetzes. In STEFaN sind die Netze auf maximal 798 Kanten begrenzt.

Einen anderen Ansatz wählen Buchert et al. [24, S. 43 ff.] in ihrem Forschungsbericht aus dem Jahr 2004, indem sie Ver- und Entsorgungsleitungen in Gebieten analysieren und daraus ein Dichtemodell entwickeln. Dieses bildet Kennwerte mit spezifischen Leitungslängen in m je m^2 Geschossfläche der jeweiligen Bebauungsleittypen. Eine Übertragbarkeit auf Wärmenetze wäre ein interessanter Ansatz, da auch diese Leitungen entlang der Straßen verlegt werden.

Im Jahr 2004 vergleichen Larsen, Bøhm und Wigbels in ihrem Artikel „A comparison of aggregated models for simulation and operational optimisation of district heating networks“ [33] zwei Ansätze, die Simulation von Wärmenetzen zu vereinfachen, indem die komplexe Netzstruktur auf eine lineare Struktur aggregiert wird. Die beiden betrachteten Ansätze stammen zum einen von Pálsson et al. aus dem Jahr 1999 [34] und Loewen, der in seiner Dissertation im Jahr 2001 [35] eine alternative Methode entwickelt. Larsen, Bøhm und Wigbels kommen zu dem Ergebnis, dass beide Methoden gut funktionieren und zu einer starken Reduktion der Rechenzeit führen [33].

1.2.3 Kennwerte in der Wärmenetzentwicklung

Die Verwendung von Kennwerten bei der Konzeption von Nahwärmenetzen dient dazu, in einer frühen Phase geeignete Gebiete herauszufiltern. Geeignete Gebiete sind Areale in welchen das Potenzial besteht, ökonomisch und ökologisch betreibbare Wärmenetze zu errichten.

Im Leitfaden Energienutzungsplan [3, S. 48] geben Hausladen und Hamacher als überschlägigen Schwellenwert der Wärmebedarfsdichte, ab der ein Gebiet für eine Wärmenetzlösung als geeignet erscheint, $150 \text{ MWh}/(\text{ha}\cdot\text{a})$ an. Vorteil dieses Schwellenwertes ist die einfache großflächige Anwendung. Da jedoch außer Wärmebedarf und Quartierfläche über das Gebiet keine weiteren Informationen vorhanden sind, können mit diesem Wert nur ungeeignete

Gebiete ausgefiltert werden. Für die als geeignet eingestuften Gebiete sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Die KfW setzt in ihrem Merkblatt: „Erneuerbare Energien“ [12] zur Förderung eines Wärmenetzes, welches aus erneuerbaren Energien gespeist wird, einen Mindestwärmeabsatz von 0,5 MWh je Trassenmeter und Jahr voraus. Im Vergleich dazu verlangt CARMEN [5] 1,5 MWh je Trassenmeter und Jahr als Mindestwärmedichte.

Für die Ermittlung der Wärmenetzlänge nach Dötsch et al. [36, S. 47] werden spezifische Netzlängen auf Basis der Anzahl an Wohneinheiten (WE) verwendet. Diese bewegen sich von 14 - 25 m/WE bei Einfamilienhausbebauung, über 6 - 14 m/WE bei Reihenhausbebauung, bis hin zu 2 - 6 m/WE bei Mehrfamilienhausbebauung.

In der Projektdokumentation „Energiebalance - Optimale Systemlösungen für erneuerbare Energien und Energieeffizienz“ geben Pehnt et al. [37, S. 210] Empfehlungen zu unterschiedlichen Netzvarianten in Passivhaussiedlungen. Wegen der positiven Bewertung hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und geringer Wärmeverluste eignen sich hier die Variante mit Kopfstation und Leitungsverlegung in den Gebäuden sowie die Variante Kalte Nahwärme für den Einsatz in Passivhaussiedlungen. Werden solche Siedlungen durch ein Fernwärmenetz von außerhalb der Siedlung versorgt, verwenden Pehnt et al. [37, S. 195] für die jährlichen Netzverluste bis zur Siedlung, bezogen auf die Wohnfläche (WF), den Wert $20 \text{ kWh/m}^2_{\text{WF}\cdot\text{a}}$.

Die unterschiedlichen Wärmeverluste des Wärmenetzes, welche entscheidend von der Rohrdämmung abhängen, zeigen Schuberth und Tschetschorke in ihrem Bericht „Strom- und Wärmeversorgung einer Siedlung bei unterschiedlichen Energieeffizienz-Standards“ [38, S. 61]. Hierbei unterscheiden sie zwischen den Gebäudestandards EnEV2009 und Passivhaus. Als Ausgangsbasis dient eine Verlegung von Einzelrohren mit Standard-Dämmdicke. Die geringsten Verluste werden hier mit einer Verlegung als Doppelrohr und 1x verstärkter Dämmung erreicht. Durch diese Verbesserung kann, für den EnEV2009 Standard, der Wärmeverlust um bis zu 44 % reduziert werden. Für den Passivhausstandard beträgt das Einsparpotenzial noch 36 %.

In ihrer Studie: „Ermittlung der Potenziale der Kraft-Wärme-Kopplung und der Erdwärme (Wärmepumpen) in Osnabrück“ beziehen Eikmeier et al. [39] die Wärmeabnahme auf den Straßenverlauf und erhalten damit Wärmelinienlängen. Über die Straßenlängen werden auch die Längen der Leitungen des Wärmenetzes bestimmt. Dieses Verfahren eignet sich für Städte, ist jedoch mit einigem Aufwand verbunden.

In der Studie: „Kosten und Marktpotenziale ländlicher Wärmenetze“ des Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH ermittelt Jens Clausen eine umfangreiche Zusammenstellung von Kostenbenchmarks [40].

Alle diese aufgeführten Methoden sind verbunden mit einer hohen Unsicherheit und können somit nur für eine erste überschlägige Untersuchung verwendet werden. Die nächste Stufe der Entwicklung von Nahwärmenetzen setzt auf detaillierte Berechnungs- und Simulationsverfahren. Hierzu sind jedoch schon konkrete Quartiersplanungen mit verorteten Gebäuden erforderlich. Diese Verfahren sind mit einem hohen Ressourcenaufwand verbunden und können deshalb nur für eine geringe Anzahl an Varianten erfolgen. Es fehlt eine Methode zwischen diesen beiden Stufen. Diese soll auf Basis der wenigen Daten die zu Beginn einer Nahwärmenetzentwicklung vorhanden sind, die zu erwartenden Netzverluste prognostizieren. Die Prognosewerte aus dieser Methode sollen eine geringere Unsicherheit aufweisen als die der Kennwertmethoden. Sie können deshalb besser dazu verwendet werden, die Anzahl an Simulationsvarianten zu reduzieren.

1.3 Zielsetzung und Forschungsfrage

Das Ziel dieser Arbeit widmet sich der Wärmeverlustprognose von Nahwärmenetzen. Diese dient zur Beurteilung der Eignung einer Wärmenetzversorgung in einem Quartier. Die aktuelle Vorgehensweise, die auf flächenbezogenen Kennwerten, wie im Leitfaden Energienutzungsplan [3, S. 15 ff.] beschrieben, basiert, weist ebenso, wie die Vorgehensweise über längenbezogene Kennwerte nach CARMEN [5, S. 4] und KfW [12, S. 3], eine hohe Unsicherheit auf. Deshalb soll in dieser Arbeit ein Verfahren entwickelt werden, welches zusätzliche Parameter in die Prognose mit einbezieht, um die Prognosegüte zu erhöhen.

Hieraus ergibt sich folgende Forschungsfrage: **„Wie lässt sich die Qualität der Prognose von Wärmeverlusten potenzieller Nahwärmenetze durch das Einbeziehen zusätzlicher Parameter gegenüber der heute üblichen Kennwertmethoden erhöhen?“**

Ein damit verbundenes Zwischenziel ist es, im Vorlauf einer konkreten Wärmenetzplanung, ein Verfahren zu entwickeln, welches aus vorhandenen Kennwerten die zukünftige Wärmenetzlänge berechnet.

Zur Beantwortung der Forschungsfrage, wird ein Verfahren entwickelt, welches schnell und unkompliziert über großräumig verfügbare Daten (z.B. Gebäudeanzahl, Gebäudequalität und unterschiedliche Flächen) Aussagen zu Netzverlusten von Nahwärmenetzen treffen kann. Die Ergebnisse dieses Verfahrens werden im Anschluss mit den Ergebnissen der bisher üblichen Methoden zur Beurteilung von Nahwärmenetzen verglichen.

1.4 Methodik

Der erste Teil dieser Arbeit erfolgt nach der Methode der Modellbildung. Es wird hier ein Simulationswerkzeug entwickelt, welches neben der Modellierung von Wärmenetzen zusätzlich einen Schwerpunkt auf die Randbedingungen, wie z.B. Klimadaten, Erdoberflächentemperaturen

und Kosten legt. Hierzu werden bereits bestehende Verfahren und Quellen analysiert und in das Simulationsmodell integriert. Das Simulationsverfahren wird im Anschluss anhand eines realen Wärmenetzes validiert.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wird mit Methoden der deskriptiven Statistik gearbeitet. Insbesondere wird die Methode der Regressionsanalyse dazu verwendet, ein Berechnungsverfahren zu entwickeln, durch das über Eingabe der unabhängigen Variablen Siedlungsfläche, Gebäudeanzahl und Gesamtwärmebedarf der relative Wärmeverlust eines Nahwärmenetzes bestimmt werden kann. Dieser dient zur Qualitätsbestimmung des Netzes.

Anschließend wird die Prognosegüte dieses Verfahrens bewertet. Hierzu wird der neu entwickelte Algorithmus mit den Verfahren nach Abschnitt 1.2.3 verglichen. Dies erfolgt über ein Modell, welches mit den unterschiedlichen Verfahren prognostiziert wird. Der Vergleich der Ergebnisse wird zeigen, ob der in dieser Arbeit erstellte Algorithmus eine höhere Prognosegüte erzielt.

1.5 Aufbau der Arbeit

Zu Beginn erfolgt die Entwicklung eines Simulationswerkzeuges zur Wärmenetzberechnung. Hierzu wird ein mathematisches Modell gebildet und in der Folge mit Parametern angereichert. Diese basieren auf unterschiedlichen Quellen. Als Beispiel sind hier Klimadaten, Verfahren zur Berechnung der Erdoberflächtemperatur und Ermittlung von Verlegekosten über Literaturecherche aufzuzählen. Zur Validierung des Simulationsverfahrens wird das von Jagnow and Wolff untersuchte Nahwärmenetz in Neueckerode verwendet [41].

Anschließend findet eine Recherche zu wichtigen Parametern einer Siedlung statt. Aus diesen werden synthetische Siedlungsmodelle erstellt. In der Regressionsanalyse werden aus den unabhängigen Variablen Siedlungsfläche, Gebäudeanzahl und Gesamtwärmebedarf der synthetischen Siedlungsmodelle Funktionen entwickelt, mit denen die relativen Wärmeverluste von Nahwärmenetzen bestimmt werden können.

Die entwickelte Simulationssoftware dient im Regressionsverfahren dazu, Wärmenetze in synthetischen Siedlungen zu simulieren. Dies generiert Eingangsdaten für die Regressionen. Zudem werden damit die Ergebnisse für weitere Siedlungen berechnet, mit denen der Algorithmus zur Netzverlustprognose validiert werden kann.

Abschließend werden die Ergebnisse mit denen aus in Abschnitt 1.2 beschriebenen Verfahren verglichen und die Abweichung diskutiert.

2. Entwicklung Simulationssoftware

2.1 Methodik der Simulationssoftware

2.1.1 Übersicht

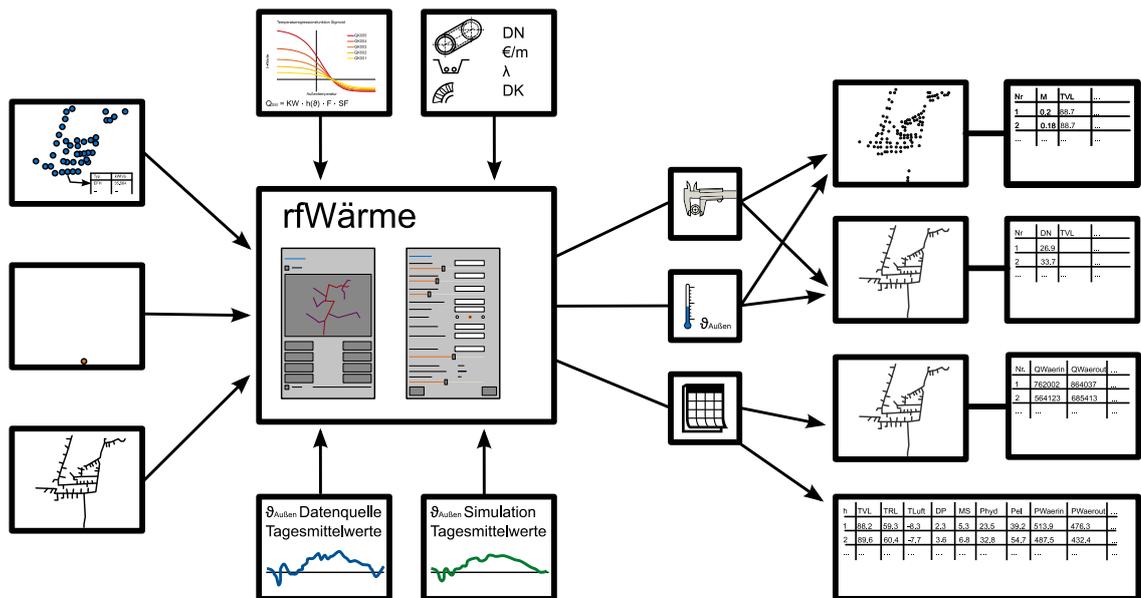


Abbildung 5 Funktionsschema des Programms rfWärme

Die Software rfWärme wird unter der GNU General Public License Version 3 [42][43] veröffentlicht und kann somit kostenfrei genutzt werden. Als Betriebssystem wird Linux verwendet. Bei der Wahl einer geeigneten Distribution sollte darauf geachtet werden, dass darin die Programmierumgebung Gambas¹ enthalten ist. Empfohlen werden hier Debian oder Ubuntu. Das Programm rfWärme wurde in Gambas [44] erstellt und benötigt diese Umgebung auch für den Betrieb.

Wie in Abbildung 5 dargestellt, arbeitet rfWärme nach dem EVA Prinzip (Eingabe, Verarbeitung, Ausgabe).

Die Eingabedaten können in zwei Gruppen unterschieden werden. In der ersten Gruppe befinden sich die projektspezifischen Daten, das sind Karten des GIS, sowie die für den jeweiligen Ort zutreffenden Klimadaten. Die zweite Gruppe beinhaltet allgemeingültige Bibliotheken. Hier gibt es wiederum zwei Datensätze. Während sich im ersten die Daten zu den Rohrleitungen (d.h. Durchmesser, Angaben zur Rohrdämmung und Preise) befinden, sind im zweiten

¹ Gambas: „Gambas Almost Means Basic“ Version 3.9.1, freie Basic Programmierumgebung unter dem Betriebssystem Linux

die Daten des Lastprofilverfahrens abgelegt. Es können hiermit Strahlennetze berechnet werden, die von einer Wärmequelle gespeist werden.

Bei der Datenverarbeitung gibt es drei Hauptfunktionen. Nachdem alle Daten in das Programm eingelesen wurden, kann in einem ersten Schritt das Nahwärmenetz mit Hilfe von Parametern automatisch dimensioniert werden. Als nächstes können verschiedene Lastfälle berechnet werden. Die Auswahl des Lastfalles erfolgt über die Außentemperatur. Über die Verwendung der Klimadaten kann das Netz mit seinen Verbrauchern in Stundenschritten über 8.760 Stunden eines beliebigen Jahres dynamisch berechnet werden. Die Verwendung von stündlichen Werten ist verglichen mit den Ausführungen von Blesl [14, S. 71] für diese Aufgabenstellung ausreichend.

Die Dateistruktur der GIS-Layer ist an die des Programms STEFaN angelehnt [32, S. 23]. Nach Einlesen der Daten aus dem GIS werden im Programm zwei GIS-Layer im Mapinfo Format erzeugt. Dieser Layer besteht aus zwei Dateien mit den Endungen .MIF und .MID. In der Datei mit der Endung .MIF werden alle Geometriedaten abgelegt, in der mit .MID endenden Datei die Datenbank in Form einer mit Tabulator getrennten Textdatei. Der erste Layer hat den Namen rfPunkte.MIF/MID. Dieser Punktlayer beinhaltet alle Knotenpunkte des Nahwärmenetzes. Der zweite Layer ist ein Linienlayer mit der Bezeichnung rfNetzTrasse.MIF/MID. Hierin sind alle Teilstrecken des Nahwärmenetzes abgelegt. Das Programm verwendet diese beiden Layer für alle weiteren Berechnungen. Nach erfolgreicher Dimensionierung sind die berechneten Durchmesser jedem Trassenteilstück zugewiesen und in der Datenbankdatei rfNetzTrasse.MID gespeichert. Die Berechnung liefert in jedem Trassenteilstück in Vor- und Rücklauf die Ergebnisse zur Länge, Mitteltemperatur, Wärmeverlust absolut sowie Wärmeverlust spezifisch und für beide zusammen den Druckverlust, den Massenstrom und die Gesamtkosten (Material und Verlegung). Diese werden in die Datei rfNetzTrasse.MID geschrieben. In den Punkten werden die Daten in der Datei rfPunkte.MID abgelegt. Berechnet werden neben dem Massenstrom die Vor- und Rücklauftemperaturen. Während der Jahressimulation werden automatisch die Berechnungen für jede Stunde im Jahr durchgeführt. Die Ergebnisse jeder Berechnung werden in einer Textdatei mit dem Format Comma-Separated Values bzw. Character-Separated Values (CSV) abgelegt. Zwischen den Werten einer Zeile, welche einer Stunde entspricht wird als Trennzeichen ein Tabulatorzeichen eingefügt. Als Ergebnisse werden Druckverluste, Vor- und Rücklauftemperaturen am Einspeisepunkt, Erdreichtemperatur, Außentemperatur, die an die Gebäude abgegebene Wärme, die eingespeiste Wärme sowie die Wärmeverluste gespeichert. Die Simulation kann durch Definition der Zeitabschnitte auf mehrere Prozesse verteilt werden. In Linux werden bei Mehrkernprozessoren die einzelnen parallel laufenden Programme auf die Prozessorkerne aufgeteilt. So kann der Rechner besser ausgelastet und die Simulationsdauer reduziert werden. Die aus jedem Simulationsprozess entstandenen Ausgabedateien werden in einer Ausgaberroutine vom Programm zu einer Datei zusammengefasst. Diese CSV Datei kann dann anschließend in einem Tabellenkalkulationsprogramm wie z.B. LibreOffice Calc weiter ausgewertet werden.

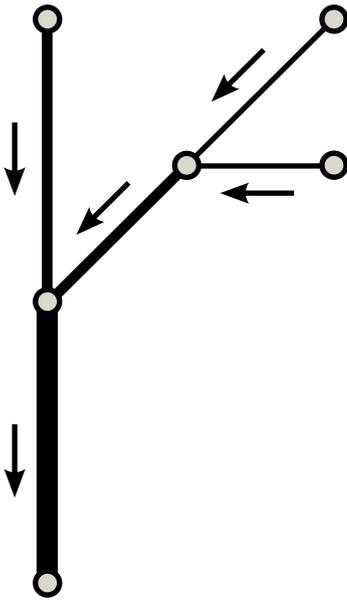


Abbildung 6 Berechnung der Massenströme im Netz

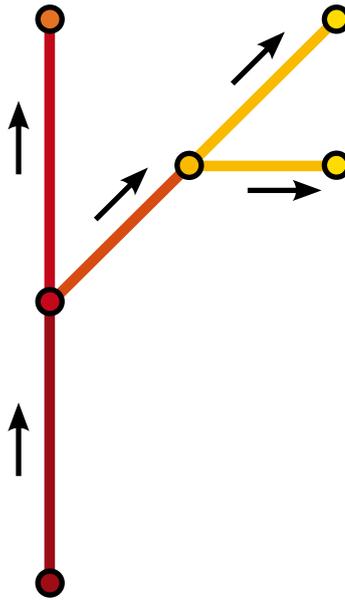


Abbildung 7 Berechnung der Vorlauftemperaturen im Netz

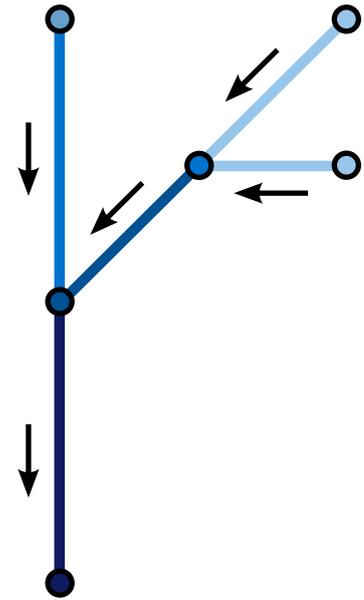


Abbildung 8 Berechnung der Rücklauftemperaturen im Netz

Die Berechnung selbst erfolgt in drei Schritten. Im ersten Schritt werden die Massenströme an den Verbrauchern definiert und anschließend in Richtung Wärmeerzeuger aufsummiert (Abbildung 6).

Als nächstes werden die Vorlauftemperaturen und Wärmeverluste der einzelnen Vorlaufteilstrecken vom Wärmeerzeuger kommend mit Hilfe der Massenströme und der einzelnen Rohrdaten in Richtung der Verbraucher berechnet (Abbildung 7).

Im letzten Schritt werden zuerst an den Verbrauchern die Rücklauftemperaturen berechnet und diese zusammen mit den Wärmeverlusten der einzelnen Rücklaufteilstrecken in Richtung Erzeuger berechnet (Abbildung 8).

Die Berechnung der Massenströme und Rücklauftemperaturen an den Verbrauchern kann wahlweise auf zwei Arten erfolgen. Durch Vorgabe der Temperaturspannung an den Verbrauchern können aus den einzelnen Wärmelasten der Gebäude die Massenströme und Rücklauftemperatur berechnet werden. In Netzen mit großzügig dimensionierten Leitungen und großen Leitungslängen entstehen im Teillastfall große Temperaturabfälle in den Vor- und Rücklaufleitungen. Um hier eine bessere Anpassung an die Realität zu erreichen, können in einem iterativen Verfahren durch Erhöhung der Massenströme die Temperaturen angepasst werden. Als Grenzen werden hier je eine minimale Vor- und Rücklauftemperatur definiert.

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{c_p \cdot \Delta T} \quad (1)$$

Die Berechnung der Massenströme aus den Einzelwärmeleistungen an den Gebäuden erfolgt über die Gleichung 1.

2.1.2 Energiebedarf

Welche relevanten Daten können für die Konzeptentwicklung von Nahwärmenetzen schnell ermittelt werden? Im Bericht „Betriebsdaten geförderter bayerischer Biomasse-Heizwerke - Auswertung Jahresberichte 2015“ des CARMEN liegen Nahwärmenetze in einem Bereich von ca. 300 bis 5.000 kW Wärmeleistung [10, S. 2]. Somit umfasst ein solches Gebiet ca. 15 - 250 Gebäude. Hier ist es relativ leicht möglich, in einer Begehung des Gebietes, energie-relevante Daten zu den Gebäuden aufzunehmen. Diese Daten umfassen Geschossanzahl, Baualtersklasse, Sanierungszustand und Gebäudetyp. Werden diese Daten in einem Geoinformationssystem (GIS) abgelegt, können hieraus gebäudebezogene Energiebedarfswerte und daraus wiederum Energiedichten berechnet werden. Beispielhaft ist hier die Vorgehensweise mit Luftbild bzw. 2D GIS Karte und Daten aus einer Begehung dargestellt:



Abbildung 9 Ermittlung der Gebäudegrundfläche in GIS

Abbildung 10 Berechnung der Energiebezugsfläche in GIS

Zu Beginn zeichnet man, wie in Abbildung 9 dargestellt, die Gebäudegrundfläche als geschlossene Polygonfläche auf eine verortete digitale Grundkarte bzw. ein verortetes Luftbild. Die GIS Software kann nun die einzelnen Gebäudegrundflächen A_{GR} anhand der Polygonflächen berechnen. Aus der Datenaufnahme vor Ort erhält man die Anzahl der Geschosse. Im Beispiel in Abbildung 10 beträgt diese wegen der Dachschräge im dritten Geschoss 2,5. Multipliziert man nun die Grundfläche mit der Anzahl der Geschosse erhält man die Brutto-Grundfläche A_{GE} des Gebäudes. Für diese Rechenschritte muss im GIS lediglich jedem Gebäude die Anzahl der Geschosse zugeordnet werden. Zur Berechnung der Energiebezugsfläche A_{EB} (Netto-Grundfläche) wird die Brutto-Grundfläche nun mit dem Faktor 0,8 multipliziert. Auf diese Weise werden die Konstruktionsflächen berücksichtigt. Für Nichtwohngebäude liegt dieser Faktor gemäß Ornth [45, S. 12 f.] zwischen 0,84 für Lagergebäude und 0,50 für Krankenhäuser.

Zur Berechnung des Gebäudeenergiebedarfs ist es nun erforderlich, jedem Gebäude einen spezifischen Energiebedarf zuzuweisen. Die einzelnen Werte können hierzu aus diversen Studien entnommen werden.

Für den Bereich **Wohngebäude** gibt es die Deutsche Wohngebäudetypologie des IWU aus dem Jahr 2015 [16, S. 17]. Darin sind die Gebäude in zwölf Baualterklassen von A bis L und in fünf Kategorien (Einfamilienhaus (EFH), Reihenhaus (RH), Mehrfamilienhaus bis 12 Wohneinheiten (MFH), großes Mehrfamilienhaus ab 13 Wohneinheiten (GMH) und Hochhaus (HH)) aufgeteilt.

Für die Untersuchung von Nahwärmenetzen ist der Endenergiebedarf ohne Verluste des Wärmeerzeugers von Bedeutung. Dieser beinhaltet sowohl den Heizenergiebedarf, als auch den Wärmebedarf zur Trinkwarmwasserbereitung inklusive der Speicher-, Verteil- und Übergabeverluste. Weil es für diesen Energiebedarf keine Bezeichnung gibt, wird er in dieser Arbeit als Brutto-Nutzenergiebedarf bezeichnet. Mit dem jeweiligen Jahresnutzungsgrad der Wärmeerzeuger aus dem TABULA Webtool [46] in Verbindung mit den Endenergiebedarfs-werten aus der Studie des IWU [16, S. 113] werden in den Tabellen 1 und 2 die auf die beheizte Nettogrundfläche bezogenen Brutto-Nutzenergiewerte für Wohngebäude berechnet.

Tabelle 1 Brutto-Nutzenergiebedarf für unsanierte Wohngebäude in kWh/(m²·a) (Quelle: Daten aus [16, S. 113][46])

Klasse	Baujahr	EFH	RH	MFH	GMH	HH
A	vor 1859	190		198		
B	1860 - 1918	188	168	164	148	
C	1919 - 1948	175	153	181	162	
D	1949 - 1957	189	166	172	161	
E	1958 - 1968	187	128	151	152	138
F	1969 - 1978	167	144	154	141	138
G	1979 - 1983	141	145	142		
H	1984 - 1994	151	121	145		
I	1995 - 2001	135	105	117		
J	2002 - 2009	105	97	86		
K	2010 - 2015	90	79	82		
L	ab 2016	84	74	63		

In den beiden Tabellen wird zwischen unsanierten und konventionell (normal) sanierten Gebäuden unterschieden. Diese Daten sind bei der Begehung mit aufzunehmen. Multipliziert man nun diese spezifischen Brutto-Nutzenergiekennwerte mit den zuvor in GIS berechneten Energiebezugsflächen, so erhält man für jedes Gebäude den Jahresenergiebedarf nach dem Wärmeerzeuger. Die Werte in den Tabellen 1 und 2 beziehen sich auf das „Referenz-Klima

Tabelle 2 Brutto-Nutzenergiebedarf für normal sanierte Wohngebäude in kWh/(m²·a) (Quelle: Daten aus [16, S. 113][46])

Klasse	Baujahr	EFH	RH	MFH	GMH	HH
A	vor 1859	119		124		
B	1860 - 1918	121	119	107	100	
C	1919 - 1948	110	97	109	98	
D	1949 - 1957	136	108	106	98	
E	1958 - 1968	142	90	95	93	85
F	1969 - 1978	116	100	101	90	86
G	1979 - 1983	102	113	96		
H	1984 - 1994	120	99	100		

Deutschland“ [16, S. 109].

Wegen der unterschiedlichen Nutzungen im **Nichtwohngebäudebereich** ist es kaum möglich, hierfür belastbare Energiebedarfskennwerte zu erhalten. In der Praxis ist es deshalb ratsam, bei größeren Nichtwohngebäuden, nach dem tatsächlichen Endenergiebedarf der letzten Jahre zu fragen. Aus diesen Werten kann dann ein klimabereinigter, auf das „Referenz-Klima Deutschland“ bezogener Endenergiebedarf errechnet werden. Berücksichtigt man auch bei diesem Wert noch den Jahresnutzungsgrad des Wärmeerzeugers, erfolgt daraus der Brutto-Nutzenergiebedarf. Sollten keine realen Werte zur Verfügung stehen, kann auf Werte aus der Studie: „Potentiale zur Reduzierung der CO₂-Emissionen bei der Wärmeversorgung von Gebäuden in Hessen bis 2012“ [47, S. 29] zurückgegriffen werden.

Weitere Daten zum Wärmeenergiebedarf von Gebäuden, insbesondere zu Abschlägen wegen bereits erfolgter Sanierung, finden sich im AGFW Heft 22 [48, S. 27-29].

2.1.3 Lastprofilverfahren

In rfWärme erfolgt die Berechnung in Stundenschritten. Diese Zeiteinheit ist in den gängigen Klimadatensätzen (z.B. Testreferenzjahr, Meteonorm) vorhanden. Die Energiekennwerte der einzelnen Gebäude lassen sich jedoch nur als Jahreswerte ermitteln. Es wird somit ein Verfahren benötigt, welches eine Umrechnung von Jahresenergiemengen in Stundenenergiemengen bzw. stündlichen Durchschnittsleistungen ermöglicht.

Ein solches Verfahren existiert in der Gaswirtschaft. In diesem Bereich erfolgt nach Ahlers, Pätzold und Seide [49, S. 9] „die Abwicklung des Gastransportes zu Ausspeisepunkten, die unterhalb der Grenzwerte für den Einbau einer registrierenden Leistungsmessung gemäß § 29 Absatz 1 Gasnetzzugangsverordnung ... liegen, ... mittels der Anwendung von Lastprofi-

len“. In der Praxis wird Erdgas im Gebäudebereich überwiegend zu Heizzwecken eingesetzt. In diesem Fall kann von einer weitgehenden Proportionalität zwischen Erdgas- und Heizenergiebedarf ausgegangen werden. Dieser Zusammenhang wird in dieser Arbeit dazu genutzt, um mit dem Lastprofilverfahren, welches von Dr.-Ing. Bernd Geiger und Dr.-Ing. Mark Hellwig [50][51] für den Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft (BGW) entwickelt wurde, die Jahresenergiekosten der einzelnen Wärmeverbraucher in Stundenwerte umzurechnen.

Es gibt für dieses Verfahren 13 Lastprofile (Tabelle 3), welche die unterschiedlichen Verbraucher beschreiben.

Tabelle 3 Kategorien für Standardlastprofile (Quelle: In Anlehnung an [49, S. 80])

Lastprofil	Bezeichnung
GMK	Metall und KFZ
GPD	Papier und Druck
GHA	Einzel- und Großhandel
GBD	sonstige betriebliche Dienstleistungen
GKO	Gebietskörperschaften, Banken und Versicherungen, Organisationen ohne Erwerbszweck
GBH	Beherbergungen
GGA	Gaststätten
GBA	Bäckerei und Konditorei
GWA	Wäscherei
GGB	Gartenbau
GMF	haushaltsähnliche Gewerbebetriebe
HEF	Ein- und Zweifamilienhäuser
HMF	Mehrfamilienhäuser

Hinter der Lastprofilbezeichnung wird in einer zweistelligen Zahl der Prozessgasanteil bzw. die Ausprägung angegeben. Der Bereich erstreckt sich bei den Nichtwohngebäuden von 01 für hohen Prozessgasanteil bis 05 für hoher Heizgasanteil und bei den Wohngebäuden von 03 für normal bis 04 für windreich [49, S. 81]. Die stündlichen Energiemengen der einzelnen Gebäude berechnen sich mit der Gleichung aus Abbildung 11.

Das Berechnungsverfahren arbeitet in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird für jeden Verbraucher ein **Kundenwert** (KW) berechnet. Dieser entspricht einem Tagesverbrauch einer durchschnittlichen Außentemperatur von etwa $8^{\circ}C$. Im zweiten Schritt wird aus diesem Kun-

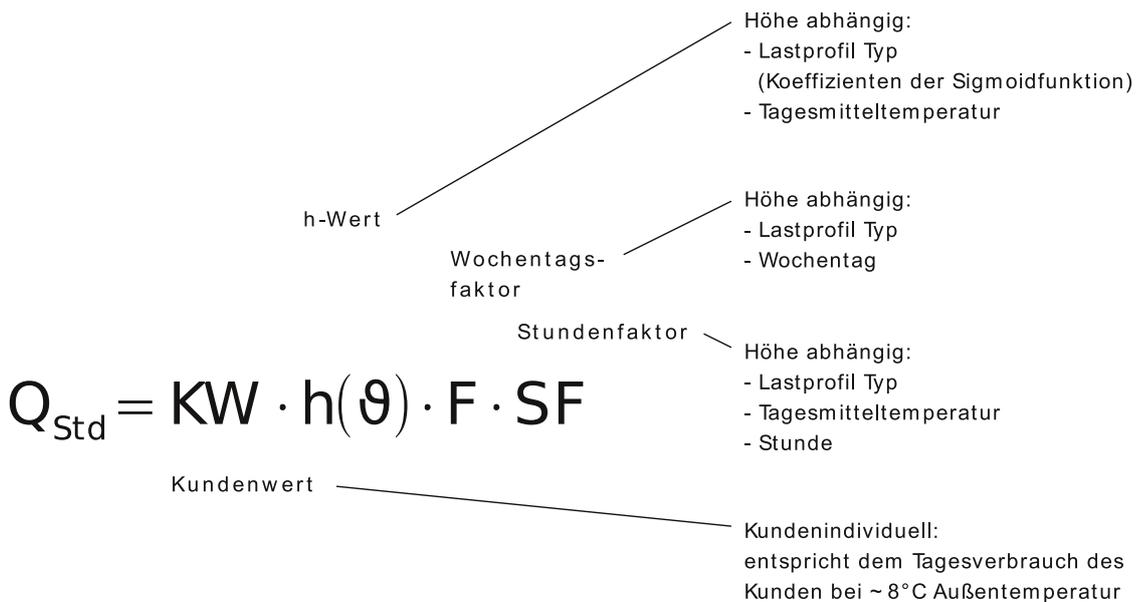


Abbildung 11 Berechnung der stündlichen Wärmemenge Q_{Std} (Quelle: In Anlehnung an [49, S. 67])

denwert unter Berücksichtigung der Tagesmitteltemperatur, des Lastprofiltyps, des Wochentages und der jeweiligen Stunde ein stündlicher Energieverbrauch berechnet. Hierzu werden die drei Faktoren $h(\vartheta)$, F und SF verwendet. Mit der **Sigmoidfunktion** $h(\vartheta)$ wird durch Eingabe der Tagesmitteltemperatur in Abhängigkeit des zugehörigen Lastprofiltyps für jeden Verbraucher bzw. jedes Gebäude der erste dieser drei Faktoren berechnet. Die einzelnen Lastprofiltypen werden mithilfe der vier Parameter A , B , C und D' in Gleichung 2 [49, S. 67] bestimmt. Für die Variable ϑ wird die Tagesmitteltemperatur eingesetzt. Die Referenztemperatur ϑ_0 beträgt konstant 40 °C.

$$h(\vartheta) = \frac{A}{1 + \left(\frac{B}{\vartheta - \vartheta_0}\right)^C} + D' \quad (2)$$

In Abbildungen 12 ist für den Lastprofiltyp GKO der Verlauf der einzelnen Ausprägungen in Abhängigkeit der Tagesmitteltemperatur dargestellt.

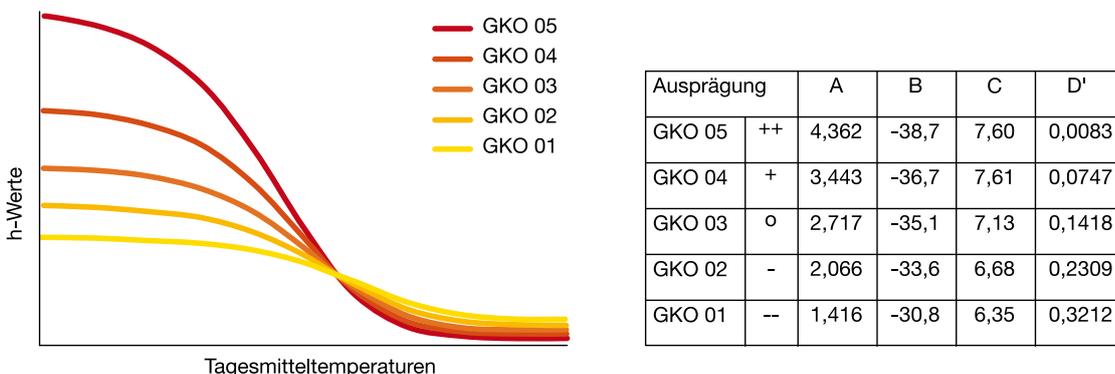


Abbildung 12 Temperaturabhängigkeit innerhalb des Lastprofiltyps GKO (Quelle: In Anlehnung an [49, S. 98])

Die Bandbreite an Lastprofilen ist in Abbildung 13 ersichtlich. Hierin ist für alle 13 Lastprofile die mittlere Ausprägung 03 aufgetragen. Der Wert $h = 1$ gilt für eine Tagesmitteltemperatur von 8°C . In diesem Punkt durchlaufen alle Graphen ihren Wendepunkt.

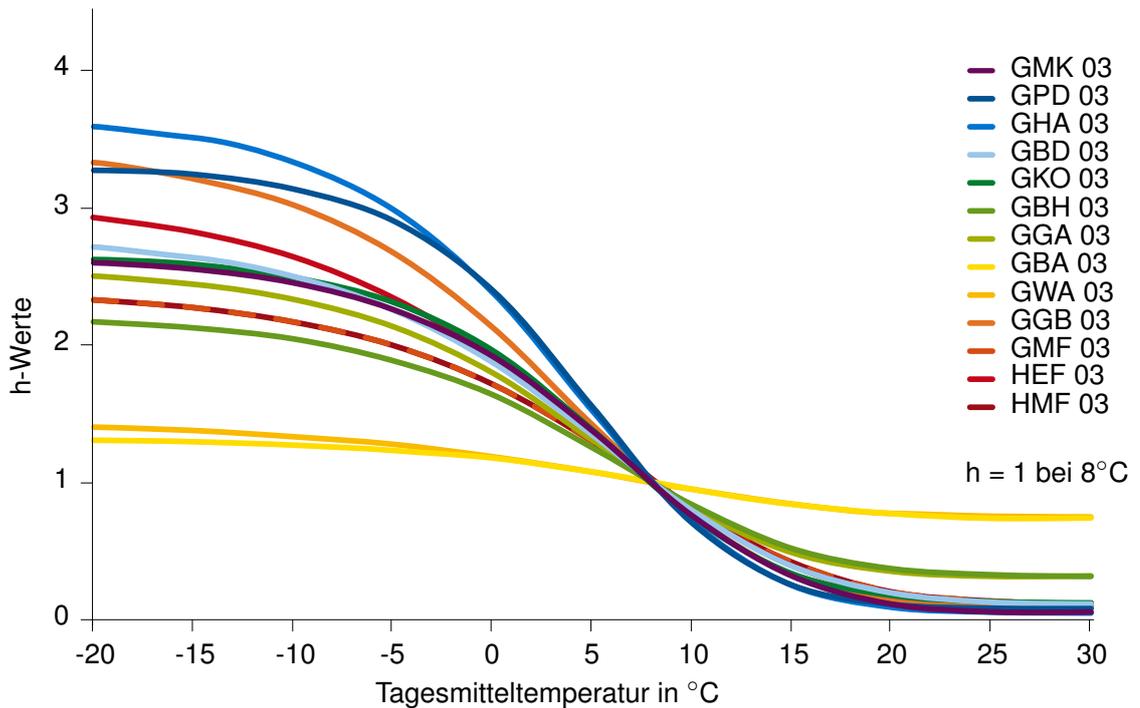


Abbildung 13 Temperatur-Regressionskurven Lastprofile Gas (Quelle: In Anlehnung an [49, S. 55])

Der **Wochentagsfaktor** F bestimmt die Ausprägung des Energiebedarfs an den unterschiedlichen Wochentagen. Am Beispiel des zuvor schon verwendeten Lastprofiltypes GKO, der im wesentlichen Gebäude mit fast ausschließlicher Nutzung an Werktagen beschreibt, werden in Tabelle 4 die Faktoren gezeigt. Anhand der Faktoren erkennt man die verkürzte Gebäudenutzung am Freitag, den Temperaturabsenkbetrieb am Wochenende und den erhöhten Energiebedarf für die Wiederaufheizphase am Sonntag. In Abbildung 14 sind die Wochentagsfaktoren aller 13 Lastprofiltypen grafisch dargestellt.

Tabelle 4 Wochentagsfaktoren F für den Lastprofiltyp GKO (Quelle: In Anlehnung an [49, S. 100])

Wochentag	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So
Faktor F	1,0354	1,0523	1,0449	1,0494	0,9885	0,8860	0,9435

Der **Stundenfaktor** SF ist als prozentualer Anteil am Tagesbedarf in Abhängigkeit von Wochentag, Uhrzeit und Außentemperatur angegeben (Tabelle 5). Die Prozentangaben beziehen sich auf die Stützwerte. Alle Stundenfaktoren zu Außentemperaturen, welche zwischen den Stützwerten liegen, werden mit Gleichung 3 berechnet. Das Beispiel in Gleichung 4 veranschaulicht dies.

$$SF(\text{Stunde}; \vartheta) = SV(\vartheta) + (SV(\vartheta_2) - SV(\vartheta_1)) \cdot \frac{(\vartheta - \vartheta_1)}{(\vartheta_2 - \vartheta_1)} \quad (3)$$

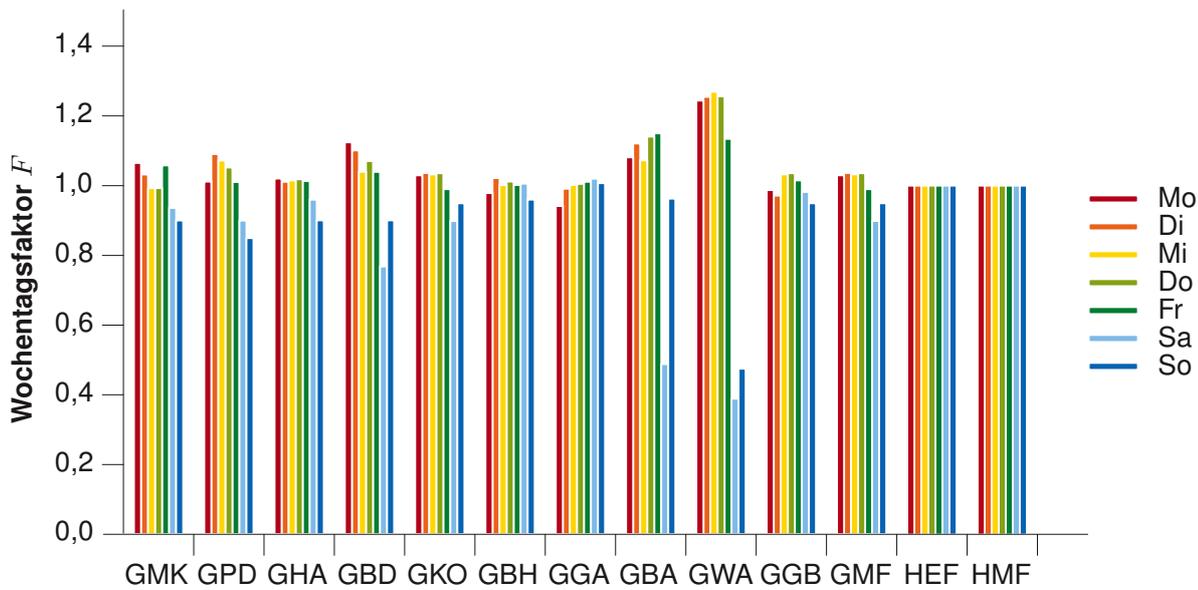


Abbildung 14 Wochentagsfaktoren F der einzelnen Lastprofile (Quelle: In Anlehnung an [49, S. 55])

$$SF(4; 11, 7^{\circ}\text{C}) = 5,33 + (5,24 - 5,33) \cdot \frac{(11, 7^{\circ}\text{C} - 7, 5^{\circ}\text{C})}{(12, 5^{\circ}\text{C} - 7, 5^{\circ}\text{C})} = 5,2544^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

Der **Kundenwert** KW ist die Basis der Lastprofilberechnung. Er wird aus dem Verbrauch eines Abrechnungszeitraumes, den zugehörigen täglichen Durchschnittstemperaturen ϑ_D und Wochentagsfaktoren $F(D)$ errechnet.

Die Gleichung 5 wird durch Weglassen des Stundenfaktors aus der Grundgleichung in Abbildung 11 gebildet. Hiermit kann der Tagesverbrauch eines beliebigen Tages im Jahr berechnet werden. Mit Gleichung 6 werden alle Tageswerte des Messzeitraums berechnet und aufsummiert. Durch Umstellen von Gleichung 5 und Kombination mit Gleichung 6 entsteht Gleichung 7, über die der Kundenwert berechnet wird. Hiermit wird mit Q_N der Energiebedarf des Abrechnungszeitraumes durch die Summe des täglichen Produkts aus Wochentagsfaktor $F(D_i)$ und Sigmoidfunktion $h(\vartheta_{D_i})$ geteilt.

$$Q_D(\vartheta) = KW \cdot F(D) \cdot h(\vartheta_D) \quad (5)$$

$$Q_N = Q_1(\vartheta_1) + Q_2(\vartheta_2) + \dots + Q_n(\vartheta_n) \quad (6)$$

$$KW = \frac{Q_N}{\sum_{i=1}^n (F(D_i) \cdot h(\vartheta_{D_i}))} \quad (7)$$

Tabelle 5 Ausschnitt aus: Stundenfaktoren SF für den Lastprofiltyp GKO (Quelle: In Anlehnung an [49, S. 100])

Lastprofil GKO			Stundenverteilung $SV(\vartheta)$ in % vom Tagesbedarf								
			1	2	3	4	5	6	7	8	
Tag	Temperatur- klasse in °C		Stütz- temp. in °C	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00
	von	bis		-7:00	-8:00	-9:00	-10:00	-11:00	-12:00	-13:00	-14:00
				Uhr	Uhr	Uhr	Uhr	Uhr	Uhr	Uhr	Uhr
Montag		-15	-17,5	5,01	5,74	6,12	4,75	4,43	4,38	4,18	4,25
	-15	-10	-12,5	4,99	5,50	5,57	4,78	4,53	4,47	4,26	4,29
	-10	-5	-7,5	5,10	5,53	5,38	4,94	4,77	4,70	4,46	4,45
	-5	0	-2,5	5,18	5,40	5,33	5,02	4,75	4,56	4,44	4,31
	0	5	2,5	5,43	5,59	5,39	5,15	4,82	4,66	4,44	4,44
	5	10	7,5	6,19	6,11	5,89	5,33	4,94	4,67	4,43	4,28
	10	15	12,5	7,71	6,81	5,97	5,24	4,91	4,57	4,22	4,03
	15	20	17,5	8,39	6,85	5,49	4,75	4,92	4,84	5,04	4,34
	20	25	22,5	9,11	7,59	5,77	4,70	4,88	4,76	5,16	4,27
	25		27,5	9,86	8,38	6,10	4,69	4,87	4,72	5,19	4,08

Im Jahr 2014 wurden von der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH (FfE) in der Studie: „Statusbericht zum Standardlastprofilverfahren Gas“ Abweichungen der mit dem Standardlastprofil (SLP) Verfahren berechneten Gasmengen von den in der Praxis gemessenen Gasmengen festgestellt [52]. Daraufhin wurde das Verfahren 2015 von der FfE weiterentwickelt, um so die Schwächen des alten SLP zu verbessern [53]. Diese lagen in zu niedriger Spitzenlast bei sehr kalten Temperaturen und zu niedriger Grundlast bei warmen Temperaturen.

Hierzu haben Hinterstocker et al. [53] die Sigmoidfunktion aus Gleichung 2 um einen Summanden erweitert, welcher die Sigmoidfunktion an den Rändern (kalte und warme Temperaturen) linearisiert. Dies führt zur als „SigLinDe“ bezeichneten Gleichung 8. Die Parameter m_H sowie m_W beschreiben die Steigung der Heiz- und Warmwassergeraden. Die beiden b Parameter geben die Höhe der jeweiligen Geraden an. In Abbildung 15 sind diese beiden Geraden dargestellt [53, S. 7].

$$h(\vartheta) = \frac{A}{1 + \left(\frac{B}{\vartheta - \vartheta_0}\right)^C} + D + \max(m_H \cdot \vartheta + b_H; m_W \cdot \vartheta + b_W) \quad (8)$$

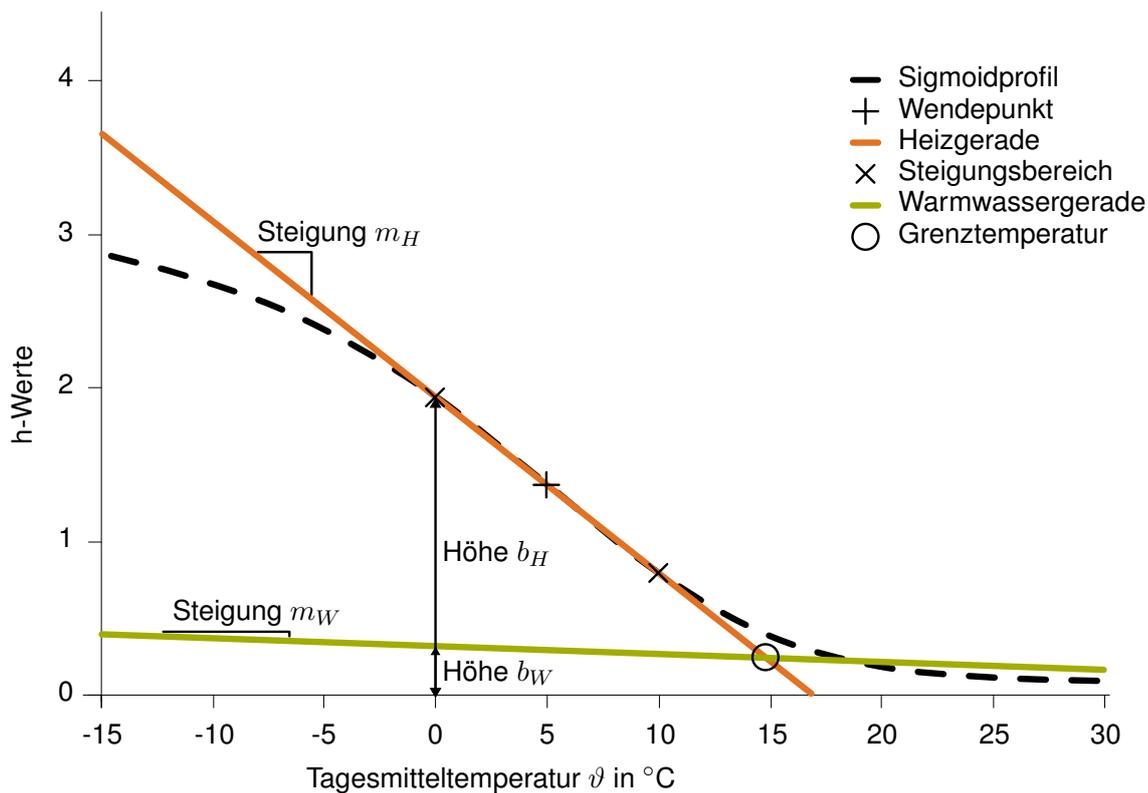


Abbildung 15 Sigmoidfunktion mit Linearisierungsanteilen (SigLinDe) (Quelle: In Anlehnung an [53, S. 7])

Im Programm rfWärme wird zur SLP-Berechnung die „SigLinDe“ Funktion benutzt. Die Profile können wahlweise mit der Ausprägung 33 oder 34 verwendet werden. Alle erforderlichen Daten sind in der Datei **rfLastprofile_SigLinDe.csv** abgelegt. Diese befindet sich ursprünglich im Ordner /opt/rfWaerme und wird vom Programm beim Anlegen eines neuen Projektes in den jeweiligen Projektordner kopiert [53, S. 24].

2.1.4 Klimadaten

Zur Anwendung des Lastprofilverfahrens werden Tagesmitteltemperaturen sowohl für den Zeitraum der Energiebedarfserhebung als auch für den Zeitraum der Simulation benötigt. Solche Klimadaten stellt der DWD mit freiem Zugriff online² zur Verfügung. Eine Übersicht aller 1.091 Messstationen in Deutschland ist in der Datei

KL_Tageswerte_Beschreibung_Stationen.txt enthalten. Des Weiteren enthält der Ordner von den Messstationen je eine Datei im Zip-Format.

Diese Zip-Dateien beinhalten wiederum an erster Stelle eine Textdatei, welche mit der Bezeichnung **produkt_klima_tag_** beginnt und wie in Abbildung 16 dargestellt, in der weiteren Bezeichnung Informationen über den Messdatenzeitraum und die Stationsnummer enthält. Darin enthalten sind die Tageswerte zeilenweise angeordnet. Für die weitere Verwendung ist nur die Spalte mit der Bezeichnung **TMK** von Bedeutung, weil hierin die Tagesmitteltemperaturen aufgeführt sind [54, S. 2].

² ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/historical/
(aufgerufen am 16.08.2017)

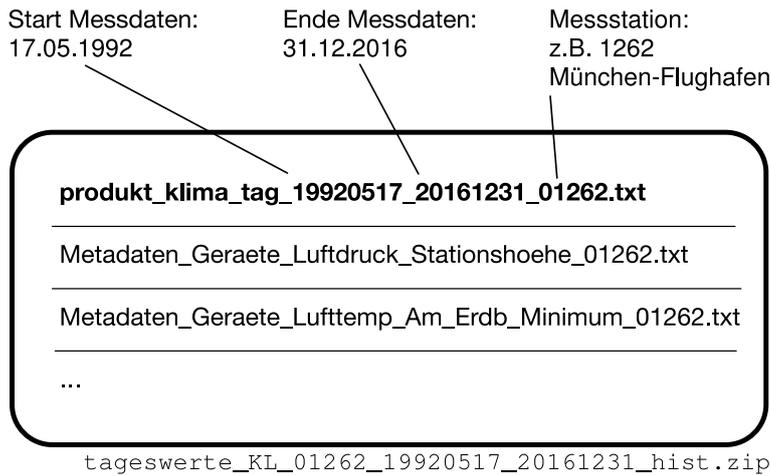


Abbildung 16 Beispieldatei DWD Klimadaten im Zip-Format

Tabelle 6 Ausschnitt aus Beispiel Klimadatei München-Flughafen (Quelle: Daten aus [54])

ID	DATUM	QN ₃	FX	FM	QN ₄	RSK	RSKF	SDK	SHKTAGNM	VPM	PM	TMK	UPM	TXK	TNK	TGK	eor	
1262	19920517	-999	-999	-999	10	0.0	0	10.600	0	2.3	9.7	973.50	15.6	53.00	22.2	13.5	13.0	eor
1262	19920518	-999	-999	-999	10	0.0	0	12.300	0	2.7	9.0	970.90	13.4	58.00	19.1	6.4	5.9	eor
1262	19920519	7	14.8	-999	10	0.0	0	11.700	0	1.0	9.5	971.20	13.2	62.00	18.2	6.4	6.4	eor
1262	19920520	7	18.2	7.8	10	0.0	0	13.100	0	0.7	8.7	967.80	14.9	50.00	20.3	9.7	9.3	eor
1262	19920521	7	10.0	3.2	10	0.0	6	8.700	0	2.7	9.5	965.70	12.4	63.00	20.5	7.7	7.0	eor
1262	19920522	7	8.7	2.7	10	0.0	0	13.300	0	5.0	9.0	964.10	16.1	52.00	22.0	4.5	4.3	eor

Mit dem Programm rfWärme kann diese Datei eingelesen werden. Nach diesem Vorgang werden für alle vollständigen enthaltenen Jahre die Heizgradtage nach VDI 3807 Blatt 1 [55] berechnet und als Übersicht dargestellt.

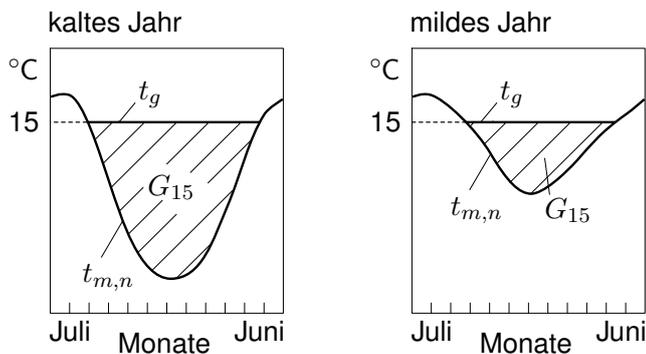


Abbildung 17 Schematische Darstellung der Heizgradtage G_{15} (Quelle: In Anlehnung an [55, S. 5])

$$G_{15} = \sum_{n=1}^z (t_g - t_{m,n}) \quad (9)$$

Die Berechnung der Heizgradtage erfolgt nach Gleichung 9 gemäß VDI 3807 [55, S. 5]. Wie in Abbildung 17 dargestellt, ist ein Heiztag definiert, als ein Tag an dem die durchschnittliche Außentemperatur ($t_{m,n}$) unterhalb der Heizgrenze (t_g) liegt. In rfWärme wird die Heizgrenztemperatur 15 °C aus der VDI 3807 übernommen. Sobald an einem Tag die durchschnittliche

Außentemperatur die Heizgrenze unterschreitet wird für diesen Tag die Differenz zwischen Heizgrenze und durchschnittlicher Außentemperatur berechnet und dieser Tag als Heiztag definiert. Für alle Heiztage im Jahr (Anzahl z) werden diese Temperaturdifferenzen aufsummiert. Anhand der so gebildeten Summen lassen sich einzelne Jahre hinsichtlich ihrer Heizperiode miteinander vergleichen. Bei hohen Werten handelt es sich um Jahre mit ausgeprägter Heizperiode.

In rfWärme sind Klimadaten zweimal einzulesen. Das erste Einlesen dient zur Berechnung des Kundenwerts aus dem SLP-Verfahren. Hierzu wird dasjenige Jahr eingelesen, welches den Gebäudewärmebedarfswerten zu Grunde liegt. Werden diese, wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, aus den Daten der TABULA-Studie [16, S. 147 ff.] berechnet, verwendet rfWärme das zu Grunde liegenden Referenzklima Deutschland [16, S. 109]. In der Energieeinsparverordnung ist unter 2.1.2 das Referenzklima Deutschland als das Klima der Region Potsdam definiert [56, S. 3963]. Deshalb wurde hierzu das Testreferenzjahr für Potsdam (Region 04) des DWD³ importiert. Nach dem Einlesen wird im Projektordner eine Datei mit dem Namen **rfKlimaTagKW.csv** erzeugt.

Beim zweiten Einlesen werden die Klimadaten, welche die Basis der Berechnung und der Simulation bilden, erstellt. In diesem Fall kann über den Kennwert „Heizgradtage“ gewählt werden, ob ein „kaltes“ oder „warmes“ Jahr verwendet werden soll. Diese Klimadaten sind in der Datei **rfKlimaTag.csv** im Projektordner gespeichert.

Wie in Abbildung 18 dargestellt, sind die beiden Dateien rfKlimaTag.csv und rfKlimaTagKW.csv fünfspaltig aufgebaut. Als Trennzeichen wird das Tabulatorzeichen verwendet. Die erste Zeile dient zur Unterscheidung zwischen Schaltjahren und normalen Jahren. Hier steht in der ersten Spalte die Anzahl der Tage. Alle weiteren Stellen werden mit Nullen aufgefüllt. Ab der zweiten Zeile werden die einzelnen Tage aufgeführt. Zu beachten ist hierbei, dass als Dezimaltrennzeichen der Tagesmitteltemperatur ein Punkt verwendet wird.

Anzahl Tage im Jahr
mit Nullen aufgefüllt

365	0	0	0	0
5.4	1	1	20	14
...
-0.7	31	12	20	14
	Tag	Monat	Jh.	Jahr

Tagesmitteltemperatur

Abbildung 18 Struktur der Klimadateien in rfWärme

Auf diese Weise können neben den Daten des DWD auch Klimadaten aus anderen Quellen in rfWärme verwendet werden. In Österreich können Daten von der Zentralanstalt für Me-

³ <http://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html> (aufgerufen am 18.08.2017)

teologie und Geodynamik (ZAMG) in Wien bezogen werden. Diese stellt für ausgewählte Stationen kostenfrei Tagesmittelwerte zur Verfügung⁴.

2.1.5 Geoinformationssysteme

Die Schnittstelle zum Datenaustausch erfolgt in rfWärme hauptsächlich über GIS Dateien. In rfWärme werden vektorbasierte Daten verwendet. Solche Daten sind im Grunde Geometriedaten mit zugeordneten Attributen. Eine GIS Software kann auf Basis von geometrischen Daten und Attributen der Ebenen (Layer) Berechnungen durchführen.

Jeder Layer enthält im Gegensatz zu Computer-Aided Design (CAD)⁵ Layern, wie in den Abbildungen 19-21 dargestellt, nur eine Art an Geometrien (Flächen, Linien oder Punkte). Die Layer werden in der Regel durch mehrere Dateien definiert. Hierbei wird in Geometrie-, Attribut- und sonstigen Dateien unterschieden.

Die Software rfWärme arbeitet mit zwei weit verbreiteten GIS Datenformaten, welche nun im Einzelnen kurz vorgestellt werden.

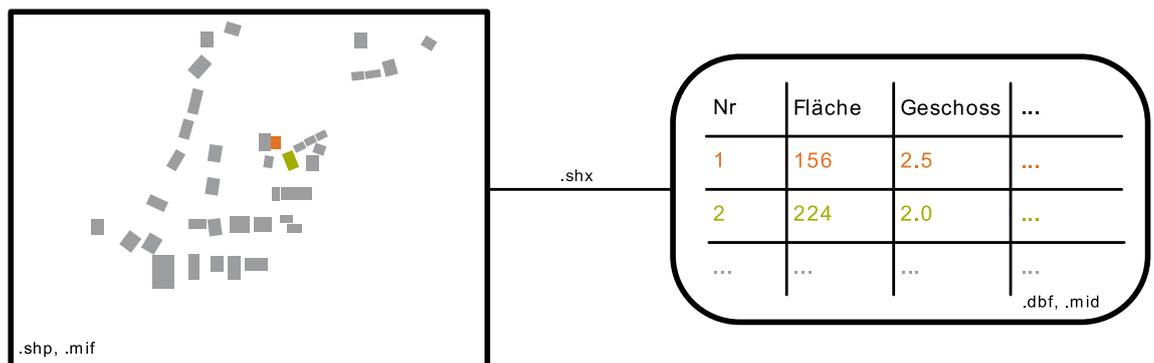


Abbildung 19 GIS Flächenlayer bestehend aus Geometrie und Datenbank

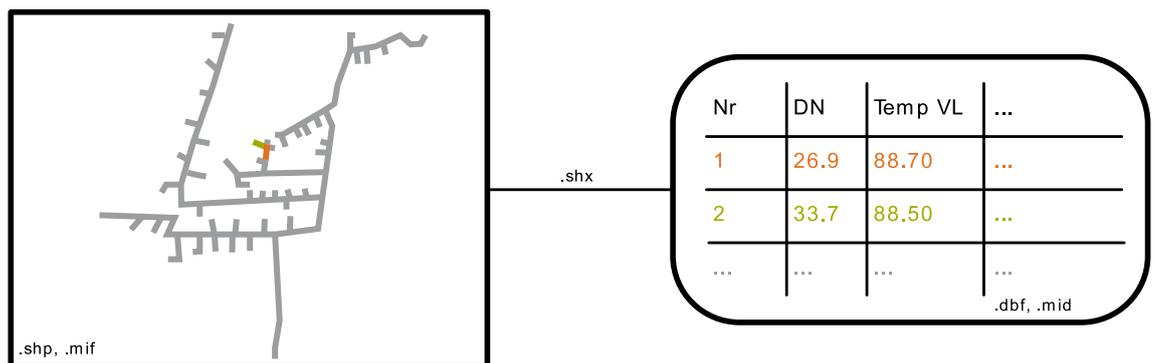


Abbildung 20 GIS Linienlayer bestehend aus Geometrie und Datenbank

Weitverbreitet und häufig auch als Austauschformat verwendet, ist das Shape Format des Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI). Dieses besteht aus drei Dateien mit gleichem Dateinamen, aber unterschiedlichen Endungen.

⁴ <http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimauebersichten/jahrbuch> (aufgerufen am 04.01.2018)

⁵ rechnerunterstütztes Konstruieren

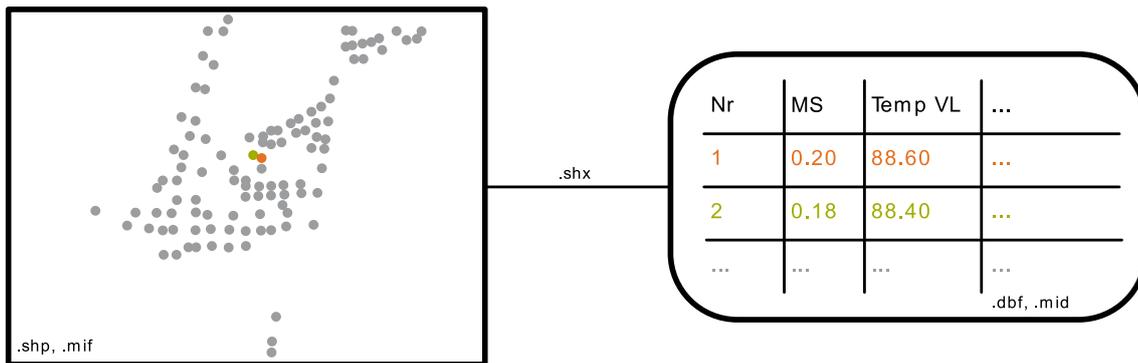


Abbildung 21 GIS Punktlayer bestehend aus Geometrie und Datenbank

Die Datei mit der Endung `.shp` enthält die geometrischen Objekte und wird als „Main file“⁶ bezeichnet. Mit `.dbf` endet eine Datenbankdatei im dBASE Format, in der die Attribute der geometrischen Objekte abgelegt sind. Als Verbindung dieser beiden funktioniert die Datei mit gleichem Namen und der Endung `.shx` („Index file“). Diese enthält die Zuweisungen, welches Attribut zu welchem Objekt gehört. Bei allen drei Dateien handelt es sich um Binärdateien [57][58].

Im Gegensatz zu ESRI Shape lassen sich die Dateien im MapInfo Interchange Format (MIF) mit jedem Texteditor öffnen, da diese nur aus ASCII Zeichen im Bereich zwischen 32 und 126 bestehen [59][60]. Sowohl für die Programmierung als auch für die spätere Überprüfung bietet das MIF Format die größeren Vorteile, so dass in rfWärme mit dem MIF Format gearbeitet wird. Weil jedoch das Shape Format in den GIS Anwendungsprogrammen verbreiteter ist, wird in rfWärme das Textzeilenbasierte Open Source Konvertierungsprogramm „ogr2ogr“ zur Umwandlung von Shape Dateien in MIF Dateien eingebunden. Die Anwendung erfolgt durch rfWärme über eine Befehlszeilenanweisung der Form:

```
ogr2ogr -f <output_format> <output_file> <options> <input_file>
```

Quelltext aus Präsentation Roger Andre, 2009 Washington GIS Conference [61]

Im Map Info Interchange Format (MIF) erfolgt die Zuordnung der Daten zur Geometrie durch eine Kopfzeile in der Datei mit der Endung `.mif`. Dieser Teil der Kopfzeile ist in Abbildung 22 farbig dargestellt. Nach der Kopfzeile folgen hinter dem Stichwort `DATA` die Geometriedaten. Jede Zeile steht für ein Objekt. Durch die gleiche Reihenfolge der Objekte in beiden Dateien werden Geometrien und Attribute zugeordnet. Jede Geometrie-Zeile beginnt mit der Objektbezeichnung. Zur Auswahl stehen: „point, line, polyline, region, arc, text, rectangle, rounded rectangle, ellipse“ [59, S. 9]. Hinter jeder Bezeichnung stehen, durch Tabulator getrennt, die Koordinaten.

⁶ Hauptdatei

Version 300	14.736842	28000.0	EFH
Charset"WindowsLatin1"	23.710526	45050.0	GKO
Columns 3	15.657895	29750.0	EFH
PMAX float	19.157895	36400.0	EFH
Q float	11.421053	21700.0	EFH
TYP char (10)	13.768421	26160.0	EFH
DATA	11.052632	21000.0	GKO
POINT 4519212.12820318 5299803.79070877	27.800993	52821.0	EFH
POINT 4519222.21598693 5299787.39310395	10.526316	20000.0	EFH
POINT 4519188.42385007 5299741.62549062	11.47831	21808.0	EFH
POINT 4519071.05225538 5299687.82254419	13.894188	26398.0	EFH
POINT 4518979.98733786 5299689.28279173	79.144579	21237.0	GGA
POINT 4519204.33495225 5299838.73730234	16.147311	30679.0	EFH
POINT 4519005.80529051 5299751.46269496	9.122889	17333.0	EFH
POINT 4519140.22354556 5299861.81675286	8.671374	16475.0	EFH
.mif	13.669552	25972.0	EFH
			.mid

Abbildung 22 Punktlayer im MIF Format; .mif: Geometriedatei, .mid: Attributdatei

In der Attributdatei .mid werden die Attribute durch Tabulator getrennt, entsprechend der Reihenfolge und in dem Variablenformat aus der Kopfzeile der .mif Datei, gelistet.

In rfWärme werden zur Eingabe drei Layer benötigt: Für die Gebäudedaten wird ein Punktlayer mit den Attributen Jahreswärmebedarf (Q) und Gebäudetyp (TYP) eingelesen (Abbildung 22). Das Attribut Jahreswärmebedarf wird als Gleitkommazahl mit der Bezeichnung „float“ definiert. Für den Gebäudetyp wird das Zeichenformat „char“ verwendet. Der Gebäudetyp besteht aus einer dreistelligen Zeichenkombination, die aus Tabelle 3 entnommen werden kann. Dieser kann die jeweilige Ausprägung (33 bzw. 34) hinzugefügt werden. Ohne dieser Angabe wird mit der Ausprägung 33 gerechnet. Werden die Daten für diesen Layer gemäß dem Verfahren aus Abbildungen 9 und 10 berechnet, ist es empfehlenswert, den Punktlayer durch die geometrische Berechnung der Schwerpunkte aus den Gebäudegrundflächen zu erzeugen und die Daten auf diesen neuen Layer zu übertragen (Abbildung 23).



Abbildung 23 Schwerpunkte aus den Gebäudegrundflächen Abbildung 24 Netztrasse als Linienlayer

Der zweite Layer beinhaltet die Rohrtrasse (Abbildung 24). Hier werden alle Rohrleitungen, zusammengefasst zu einer Linie, als Strahlennetz [62, S. 409 f.] vom Wärmeerzeuger in Richtung Abnehmer gezeichnet. Hierbei ist zu beachten, dass von einem Knotenpunkt maximal

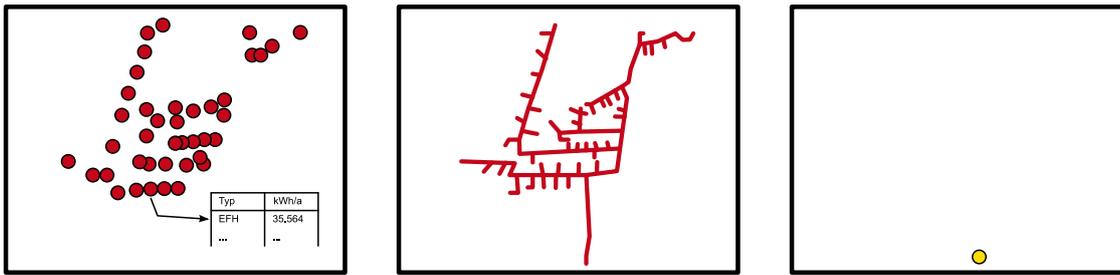


Abbildung 25 Punktlayer Abnehmer, Linienlayer Netztrasse, Punktlayer Wärmequelle

vier Linien abgehen dürfen. Für eine fehlerfreie Berechnung ist ein präzises Konstruieren mit Objektfängen unerlässlich. Die Attribute des Linienlayers sind für die Berechnung nicht von Bedeutung. Um das Netz zu schließen, wird an der Stelle der Einspeisung ein Punktlayer mit maximal einem Objekt als Position des Wärmeerzeugers benötigt. Auch bei diesem Layer sind die Attribute für die Berechnung unbedeutend, da sich die erforderliche Wärmemenge aus dem Bedarf der Verbraucher aufsummiert. In Abbildung 25 sind alle drei erforderlichen Eingangslayer dargestellt.

2.1.6 Mathematische Modelle

Beim Einlesen der Eingangslayer werden zwei neue GIS-Layer erzeugt. Einer mit dem Namen rfNetztrasse und rfPunkte. Darin werden während der weiteren Schritte alle Daten gespeichert. Die Eingangsdatenlayer werden nur bei der Initialisierung als Datenquelle verwendet.

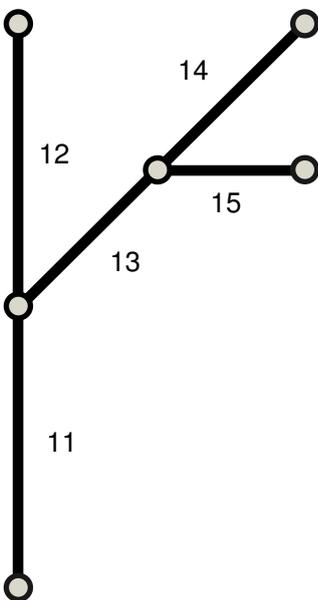


Abbildung 26 Objektnumerierung im Layer rfNetzTrasse

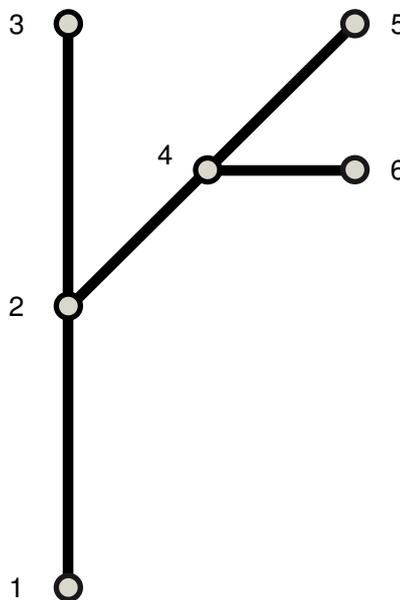


Abbildung 27 Objektnumerierung im Layer rfPunkte

In den Abbildungen 26 und 27 ist ein Ausschnitt einer solchen Netzstruktur beispielhaft dargestellt. Hierbei verbinden die Strecken des Linienlayers rfNetzTrasse die Knoten des Punktlayers rfPunkte. Die räumliche Struktur der Layer wird für die spätere Berechnung innerhalb der Datensätze abgelegt. Im Layer rfNetzTrasse werden in der ersten Spalte (Tra) die

Trassenabschnitte durchnummeriert. Die beiden Spalten Anfangsknoten (AKnt) und Endknoten (EKnt) in Tabelle 7 stellen den Bezug zum Layer rfPunkte her.

Tabelle 7 Ausschnitt aus dem Datensatz rfNetzTrasse

Tra	AKnt	EKnt
11	1	2
12	2	3
13	2	4
14	4	5
15	4	6

Tabelle 8 Ausschnitt aus dem Datensatz rfPunkte

Knt	KntV1	TraV1	KntAnz	KntN1	TraN1	KntN2	TraN2	KntN3	TraN3
1	0	0	1	2	11	0	0	0	0
2	1	11	2	3	12	4	13	0	0
4	2	13	2	5	14	6	15	0	0

Auch im Layer rfPunkte dient die erste Spalte zur Durchnummerierung der Objekte. In den folgenden Spalten werden sowohl die Bezüge zu den anderen Knoten innerhalb des Layers, als auch zu den angrenzenden Objekten aus dem Layer rfNetzTrasse hergestellt (Tabelle 8). Das Kürzel „Knt“ steht für Knoten, gefolgt von der Kennzeichnung „V“ für vorheriger oder „N“ für nachfolgender Knoten. Die Zahl gruppiert die Knoten und Trassenstücke entsprechend ihres Abzweigs. In der Spalte „KntNAnz“ wird die Zahl der nachfolgenden Knoten abgelegt. Maximal sind drei Knoten möglich. Daraus folgt die Begrenzung von maximal vier Teilstrecken, die in einem Punkt verbunden werden können.

Mit dem Eintrag „Null“ werden alle Felder innerhalb der Datensätze versehen, die keine Vorgänger- oder Nachfolgerobjekte besitzen.

Diese Art der Strukturierung ermöglicht es, innerhalb der Berechnung von einem Punkt zum nächsten zu gelangen und so das Netz wie in Abbildungen 6 bis 8 dargestellt, vorwärts und rückwärts durchzurechnen.

Im ersten Berechnungsschritt werden die Massenströme ermittelt. Die Berechnung beginnt hier bei den Abnehmern, addiert an den Abzweigen die Teilmassenströme auf und überträgt sie an die Objekte in Richtung Wärmeerzeuger (Abbildung 6). Bei der Berechnung der Vorlauftemperaturen werden, wie in Abbildung 28, an den Abzweigen die Werte der Temperaturen von den ankommenden Strecken auf die abgehenden Strecken übertragen. In der Gegenrichtung werden die Rücklauftemperaturen, wie in Abbildung 29 dargestellt, berech-

net. Hier berechnet sich die jeweilige Mischtemperatur proportional zu den Massenströmen gemäß den Gleichungen 10 und 11.

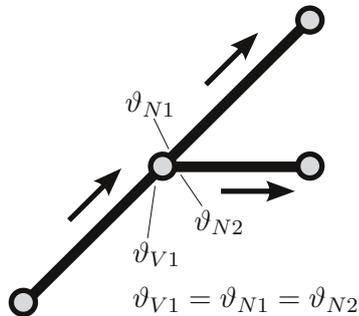


Abbildung 28 Berechnung der Vorlauftemperaturen am Knoten

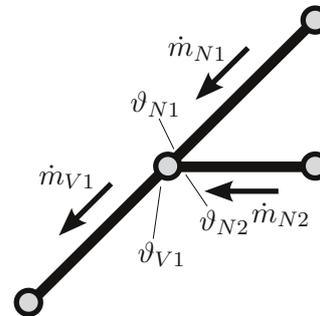


Abbildung 29 Berechnung der Rücklauftemperaturen am Knoten

$$\vartheta_{V1} = \frac{\vartheta_{N1} \cdot \dot{m}_{N1} + \vartheta_{N2} \cdot \dot{m}_{N2}}{\dot{m}_{V1}} \quad (10)$$

$$\dot{m}_{V1} = \dot{m}_{N1} + \dot{m}_{N2} \quad (11)$$

Wird ein Wärmeträgermedium durch ein Rohr geleitet, stellt sich ein Wärmestrom durch die Rohrwand ein, der in Abhängigkeit von Rohrdämmung, Geometrie und Massenstrom zu einer Abkühlung des Mediums führt. Die Berechnung dieses Temperaturabfalls wird nach Glück [63, S. 390] mit der Gleichung 12 berechnet. Diese verwendet einen flächenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten k_A . Über eine Umformung kann Gleichung 12 in eine längenbezogene Form gebracht werden (Gleichung 13).

$$\vartheta_2 = \vartheta_U + (\vartheta_1 - \vartheta_U) \cdot e^{-\frac{k_A \cdot U \cdot L}{c_p \cdot \dot{m}}} \quad (12)$$

$$\vartheta_2 = \vartheta_U + (\vartheta_1 - \vartheta_U) \cdot e^{-\frac{k_L \cdot L}{c_p \cdot \dot{m}}} \quad (13)$$

$$k_L = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_i \cdot 2 \cdot R_1} + \frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2 \cdot \lambda_R} + \frac{\ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)}{2 \cdot \lambda_D} + \frac{1}{\alpha_a \cdot 2 \cdot R_3}} \quad (14)$$

$$k_L = \frac{\pi}{\frac{\ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)}{2 \cdot \lambda_D}} \quad (15)$$

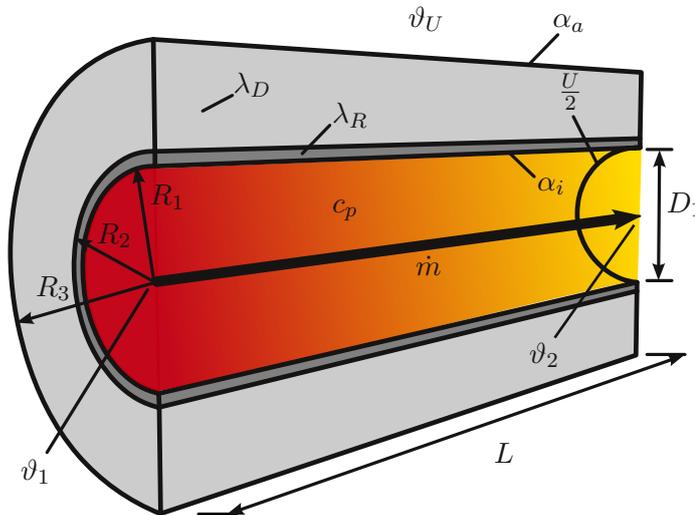


Abbildung 30 Darstellung Temperaturabfall Wärmeträgermedium in einem Rohr

Für die Berechnung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten k_L wird aus dem VDI Wärmeatlas [64, Eb1 (2)] die Gleichung 14 verwendet. Diese enthält vier Summanden im Nenner.

Der erste Summand beschreibt den Wärmeübergang vom Wärmeträger in das Rohr. Maßgeblich hierfür ist der Wärmeübergangskoeffizient α_i . Dieser Faktor hängt von der Strömung im Rohr ab, welche durch die Reynoldszahl Re beschrieben wird. Bis zu einem Wert von ca. 2.300 herrscht im Rohr eine laminare Strömung. Oberhalb von 2.300 schlägt diese in eine turbulente Strömung um. Eine turbulente Strömung führt zu einem höheren Wärmeübergang durch Konvektion an die Rohrwand. Dies drückt sich in einem höheren Wärmeübergangskoeffizienten α_i aus.

Tabelle 9 Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit der Reynoldszahl (Quelle: Daten aus [65])

Reynoldszahl Re	< 2.300	2.300 - 10.000	> 10.000
Wärmeübergangskoeffizient α_i	840 - 2.500	3.350 - 10.500	16.500 - 42.000

Wie aus Tabelle 9 nach Netz [65] ersichtlich ist, liegen die Werte hierfür in einem Bereich zwischen 840 und 42.000. Berechnet man nun den Wärmeübergangswiderstand vom Wärmeträgermedium zum Rohr für einen durchschnittlichen Rohrdurchmesser von 5 cm, so liegt der Wert in einem Bereich von 0,0005 - 0,02 $\frac{m^2 K}{W}$. Auf einen vergleichbaren Wert kommt das Berechnungsbeispiel 4.5 im VDI Wärmeatlas [64, Ga8]. Hier wird in Tabelle 1 für α der Wert 3.286 $\frac{W}{m^2 K}$ ausgewiesen. Dies entspricht einem Übergangswiderstand von 0,0003 $\frac{m^2 K}{W}$.

Der Widerstand durch den Dämmstoff wird durch den dritten Summanden im Nenner in Gleichung 14 berechnet. Bei einer beispielhaften Dämmstärke von 5 cm und Wärmeleitgruppe 0,035 $\frac{W}{mK}$ ergibt sich ein Widerstandswert von $16 \frac{m^2K}{W}$. Vergleicht man diesen mit dem Widerstand des ersten Summanden, zeigt sich, dass der Widerstand vom Wärmeträgermedium zum Rohr vernachlässigbar gering ist.

Der zweite Summand im Nenner von Gleichung 14 beschreibt den Wärmedurchgangswiderstand durch die Rohrwand. Für das zuvor beschriebene Stahlrohr mit dem Durchmesser 5 cm und einer Wandstärke von 3mm ergibt sich ein Durchgangswiderstand von $0,0009 \frac{m^2K}{W}$. Auch dieser kann, verglichen mit dem zuvor berechneten Widerstand durch die Beispieldämmung ($16 \frac{m^2K}{W}$), vernachlässigt werden.

Der vierte Summand im Nenner von Gleichung 14 steht für den Widerstand vom Rohr an das Erdreich. Wegen des direkten Kontakts tendiert dieser gegen Null und wird somit auch nicht weiter betrachtet. Die zuvor beschriebenen Vereinfachungen von Gleichung 14 führen nun zu Gleichung 15.

Die Bestimmung der Umgebungstemperatur ϑ_U im Erdreich erfolgt nach dem Verfahren von Dahlem [66, S. 24]. Hierin wird mit Gleichung 16 über eine Cosinusfunktion der Jahresverlauf der Temperatur in einer bestimmten Tiefe z berechnet.

$$\vartheta_{U(z,t)} = \vartheta_{mid} + G \cdot z + \vartheta_{amp} \cdot e^{-z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a \cdot t_0}}} \cdot \cos \left(z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a \cdot t_0}} - 2\pi \cdot \frac{t}{t_0} \right) \quad (16)$$

Der geothermische Gradient G liegt nach Ondrak et al. [67] in Deutschland bei $0,03 \frac{K}{m}$. Als frostfreie Verlegetiefe z werden in der Praxis übliche 1,25 m gewählt [5, S. 2]. Eine mittlere Temperaturleitfähigkeit des Erdreichs a ergibt sich nach Ondrak et al. [67] zu $0,125 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$. Weil die Periode der Sinusfunktion t_0 ein Jahr beträgt werden hierfür 365 d eingesetzt. Für den Betrachtungszeitpunkt t wird der jeweilige Tag im Jahr (1-365) eingesetzt.

Um die Cosinusfunktion in der Lage und der Amplitude zu bestimmen, sind die jährliche mittlere Erdreichoberflächentemperatur ϑ_{mid} und die Amplitude der Erdreichoberflächentemperatur ϑ_{amp} erforderlich. Zum Berechnen dieser beiden Werte wurde ein Verfahren entwickelt, welches eine Umrechnung täglicher Außenlufttemperaturen auf tägliche Erdoberflächentemperaturen ermöglicht. In Abbildung 31 ist anhand von 24.037 Temperaturpaaren (Lufttemperatur⁷, Erdreichtemperatur in 2 cm Tiefe⁸) der Stadt Augsburg der Zusammenhang ersichtlich, der durch Regression zu zwei Geradengleichungen führt.

⁷ ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/historical/tageswerte_KL_00232_19470101_20161231_hist.zip (aufgerufen am 04.01.2018)

⁸ ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/climate/daily/soil_temperature/historical/tageswerte_EB_00232_19510101_20161231_hist.zip (aufgerufen am 04.01.2018)

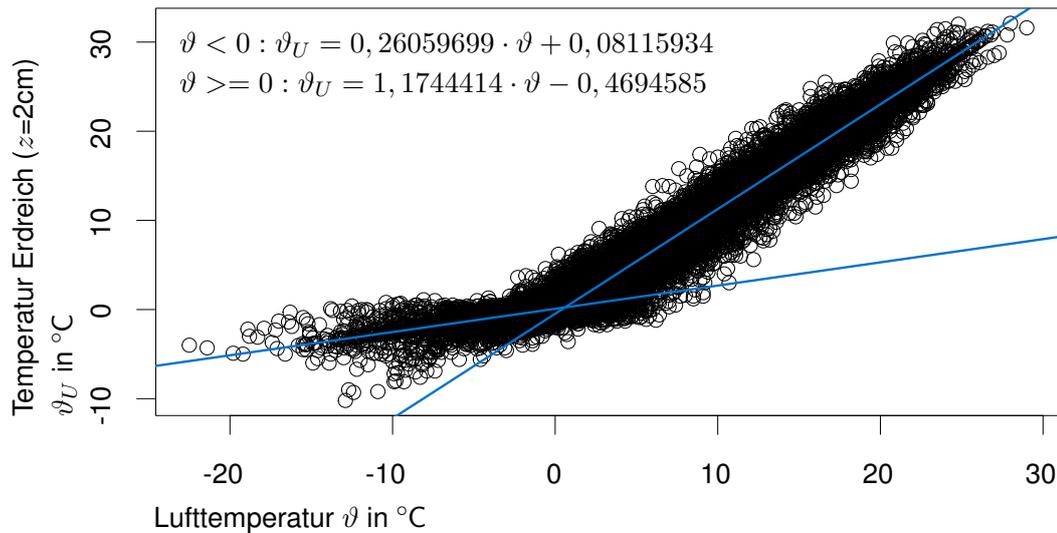


Abbildung 31 Tagesmittelwerte Augsburg 01.01.1951 - 31.12.2016 (Quelle: Daten aus [68])

Mit diesen Gleichungen werden die jährliche mittlere Erdoberflächentemperatur ϑ_{mid} und die Amplitude der Erdoberflächentemperatur ϑ_{amp} für die verwendeten Klimadaten berechnet und in der Gleichung 16 berücksichtigt.

Eine weitere wichtige Größe im Bereich des Rohrnetzes ist der Druckverlust, welcher durch die Strömung des Wärmeträgermediums hervorgerufen wird. Die Berechnung dieser Größe erfolgt hier nach der Vorgehensweise von Gnüchtel [32, S. 12] in der Software STEFaN. Hierzu wird die Gleichung 17 von Gnüchtel übernommen. Als Eingangsgrößen verwendet die Berechnung die Wasserdichte ρ , die Rohrrauigkeit k , den Zuschlagsfaktor α für längenbezogene Druckverluste aus Formstücken, den Massenstrom \dot{m} , die Rohrlänge L und den inneren Rohrdurchmesser d_i .

$$\Delta p = \frac{0,88}{\pi \cdot \rho} \cdot k^{0,25} \cdot (\alpha + 1) \cdot \dot{m}^2 \cdot \frac{L}{d_i^{5,25}} \quad (17)$$

2.1.7 Rohrdaten

Zur automatischen Dimensionierung für die Berechnung des Wärmeverlustes, aber auch zur Kostenbestimmung sind Daten zu den unterschiedlichen Rohrarten erforderlich. Für die Dimensionierung werden die Angaben der Nennweiten DN bzw. der Rohrrinnendurchmesser und deren Abstufungen benötigt. In dieser Arbeit werden zwei Systeme betrachtet: zum einen flexible vernetzte Polyethylen Rohre (PE-Xa) nach DIN EN 15875-2 [62, S. 192] und zum anderen starre Kunststoffmantelrohre (KMR) mit Stahlmediumrohren nach AGFW FW401 [62, S. 191].

Für die Berechnung der Wärmeverluste sind Angaben zu den jeweiligen Dämmstärken, sowie den entsprechenden Wärmeleitwerten notwendig. Diese sind dem Planungshandbuch-Isoplus [69] entnommen und in Tabelle 10 dargestellt.

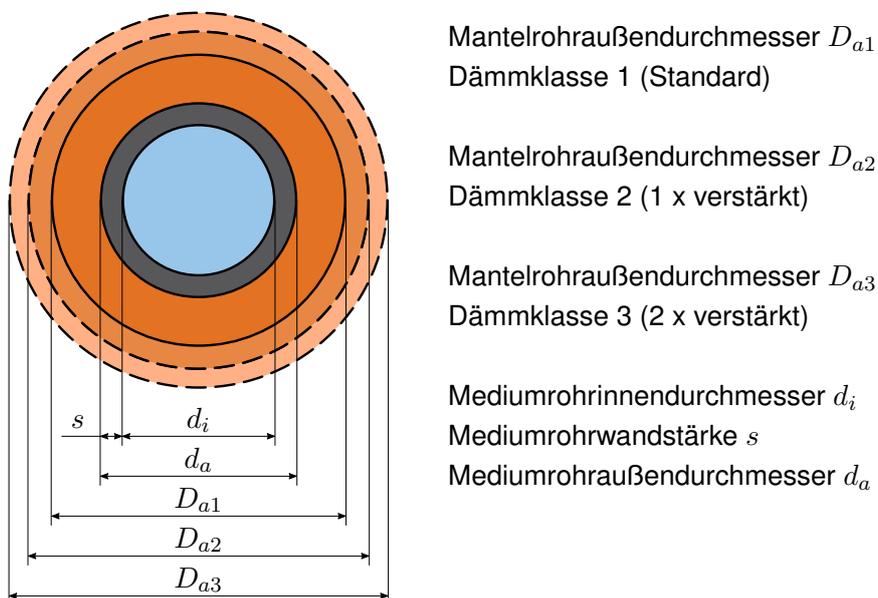


Abbildung 32 Darstellung der unterschiedlichen Rohrdurchmesser in Tabelle 10

Tabelle 10 Dimensionen starrer Kunststoffmantelrohre (KMR) (Quelle: Daten aus [69])

Nennweite	d_i [mm]	d_a [mm]	s [mm]	D_{a1} [mm]	D_{a2} [mm]	D_{a3} [mm]	λ [W/mK]
DN25	27,3	33,7	3,2	90	110	125	0,0270
DN32	36,0	42,4	3,2	110	125	140	0,0270
DN40	41,9	48,3	3,2	110	125	140	0,0270
DN50	53,9	60,3	3,2	125	140	160	0,0270
DN65	69,7	76,1	3,2	140	160	180	0,0270
DN80	82,5	88,9	3,2	160	180	200	0,0270
DN100	107,1	114,3	3,6	200	225	250	0,0270
DN125	132,5	139,7	3,6	225	250	280	0,0270
DN150	160,3	168,3	4,0	250	280	315	0,0270
DN200	210,1	219,1	4,5	315	355	400	0,0270
DN250	263,0	273,0	5,0	400	450	500	0,0270
DN300	312,7	323,9	5,6	450	500	560	0,0270

Am Ende soll das Wärmenetz auch wirtschaftlich untersucht werden. Die hierfür benötigten Kosten stammen zum einen aus den Daten von Manderfeld [70] und zum anderen aus einer

Tabelle 11 Dimensionen flexibler vernetzter Polyethylen Rohre (PE-Xa) (Quelle: Daten aus [69])

Nennweite	d_i [mm]	d_a [mm]	s [mm]	D_{a1} [mm]	D_{a2} [mm]	D_{a3} [mm]	λ [W/mK]
DN25	26,2	32	2,9	75	90	-	0,0218
DN32	32,6	40	3,7	90	110	-	0,0218
DN40	40,8	50	4,6	110	120	-	0,0218
DN50	51,4	63	5,8	125	140	-	0,0218
DN65	73,6	90	8,2	160	180	-	0,0218
DN80	90,0	110	10,0	160	180	200	0,0218
DN100	102,2	125	11,4	180	200	-	0,0218
DN125	114,6	140	12,7	200	-	-	0,0218

eigenen Erhebung aus dem Jahr 2011. Um eine Vergleichbarkeit dieser beiden Quellen herstellen zu können und für die Berechnungen aktuelle Daten zu erhalten, sind alle Preisdaten auf das Jahr 2016 preisbereinigt.

In den Abbildungen 34 - 37 sind in hellblau die Materialkosten dargestellt.

Die Preise für die Rohrarten KMR D, KMR E, PEX D und PEX E sind von Manderfeld [70] übernommen. Diese beziehen sich auf das Jahr 2006. Zur Preisbereinigung wird unterschieden in Kunststoffrohre und in Stahlrohre. Die Umrechnungsfaktoren werden aus den Indizes der Lange Reihen der Fachserie 17, Reihe 2 von Januar 2000 bis Oktober 2017 des Statistischen Bundesamtes [71] berechnet. Für Stahlrohre ergibt sich aus den Werten der Tabelle 280 Stahlrohre, Rohrform-, Rohrverschluss- und Rohrverbindungsstücke, aus Eisen oder Stahl 94,2 % (2006) und 96,7 % (2017) der Faktor 102,7 %. Für Kunststoffrohre ergibt sich aus den Werten der Tabelle 225 Platten, Folien, Schläuche und Profile, aus Kunststoffen 98,4 % (2006) und 106,4 % (2017) der Faktor 108,1 %. Die Preise aus einer eigenen Erhebung im Jahr 2011 beziehen sich auf das Preisniveau von 2010. In den Abbildungen 34 - 37 werden die Rohre als KMR E K1-K3 bezeichnet. Auch diese werden mit der Tabelle 280 für Stahlrohre, Rohrform-, Rohrverschluss- und Rohrverbindungsstücke, aus Eisen oder Stahl [71] auf des Preisniveau von 2016 bereinigt. Der Faktor ist hier 96,7 % (2016), bezogen auf 100 % im Jahr 2010. Die Tief- und Rohrbaukosten nach Manderfeld stammen aus dem Jahr 2004. Zur Umrechnung der Preise auf das Niveau im Jahr 2016 werden die Preisindizes für Ortskanäle aus der Fachserie 17 Reihe 4 des Statistischen Bundesamtes [72] verwendet. Aus den Werten 87,5 % (2004) und 111,9 % (2016) ergibt sich der Bereinigungsfaktor 127,9 %. Bei der Preisbetrachtung wird unterschieden in Tiefbau- und Rohrmontagekosten, sowie Rohrmaterialkosten. Die Tiefbau- und Rohrmontagekosten von Manderfeld [70] enden mit der Dimension DN150. Zur Bestimmung der Kosten bis DN300 werden diese mit Hilfe von linearen Regressionen berechnet. Das Bestimmtheitsmaß R^2 liegt bei allen vier Vari-

anten zwischen 98,99 % und 99,54 %. In Abbildung 33 sind diese vier Varianten inklusive Kostenberechnungsformel dargestellt.

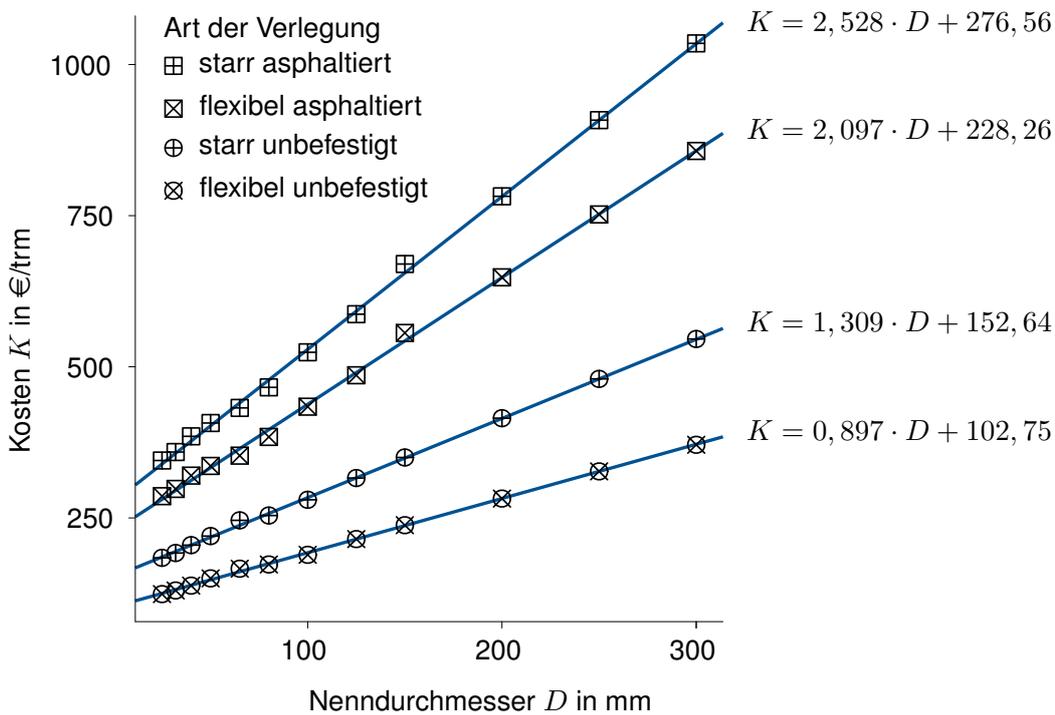


Abbildung 33 Lineare Regressionen zur Bestimmung der Baukosten ab DN200

Die Daten zu Durchmessern, Wärmeleitfähigkeiten und Preisen werden in der Datei **Rohre.csv** abgelegt. Hierbei handelt es sich um eine „Comma-separated-values“-Datei, welche als Trennzeichen Tabulatorzeichen enthält. Die Spalten beinhalten der Reihe nach folgende Daten: Nenndurchmesser [mm], Innendurchmesser [mm], Außendurchmesser Mediumrohr [mm], Rohrwandstärke [mm], Außendurchmesser K1 [mm], Außendurchmesser K2 [mm], Außendurchmesser K3 [mm], Lambdawert Dämmung [W/mK], Trassenkosten K1 [EUR/m], Trassenkosten K2 [EUR/m], Trassenkosten K3 [EUR/m] und Tiefbaukosten inkl. Montagekosten [EUR/m]. Die Trassenkosten beinhalten Material, Montage und Tiefbau.⁹

⁹ KMR: Kunststoffmantelverbundrohr (D=Doppelrohr, E=Einzelrohre, K1=Dämmklasse1, K2=Dämmklasse2, K3=Dämmklasse3)
 PEX: vernetztes Polyethylenrohr (D=Doppelrohr, E=Einzelrohre)

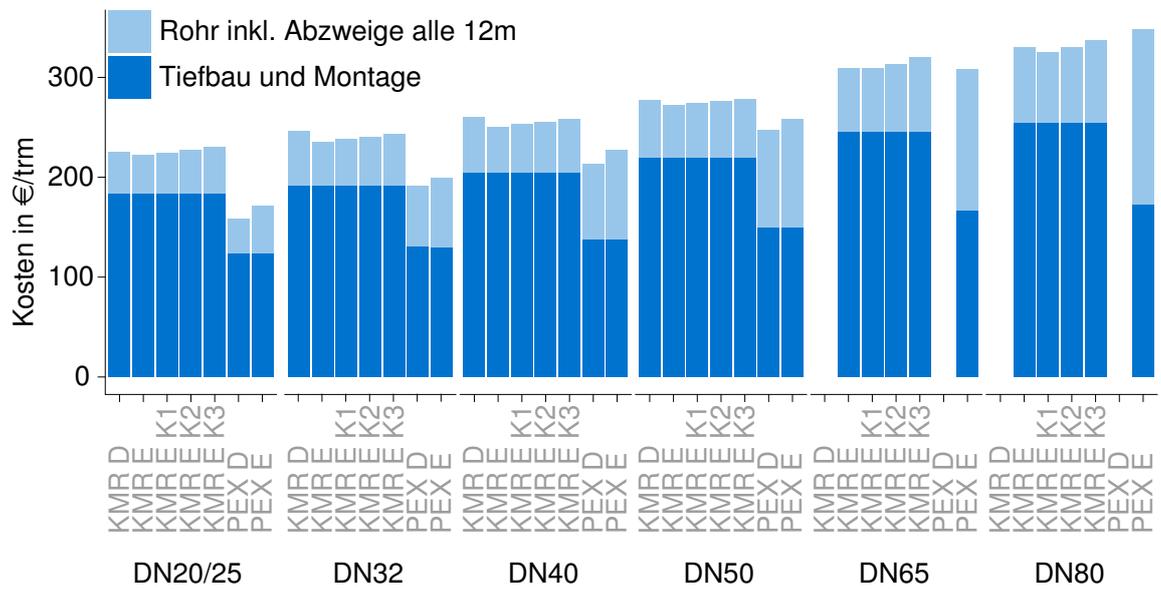


Abbildung 34 Kosten von Wärmenetzen, unbefestigte Oberflächen DN20 - DN80

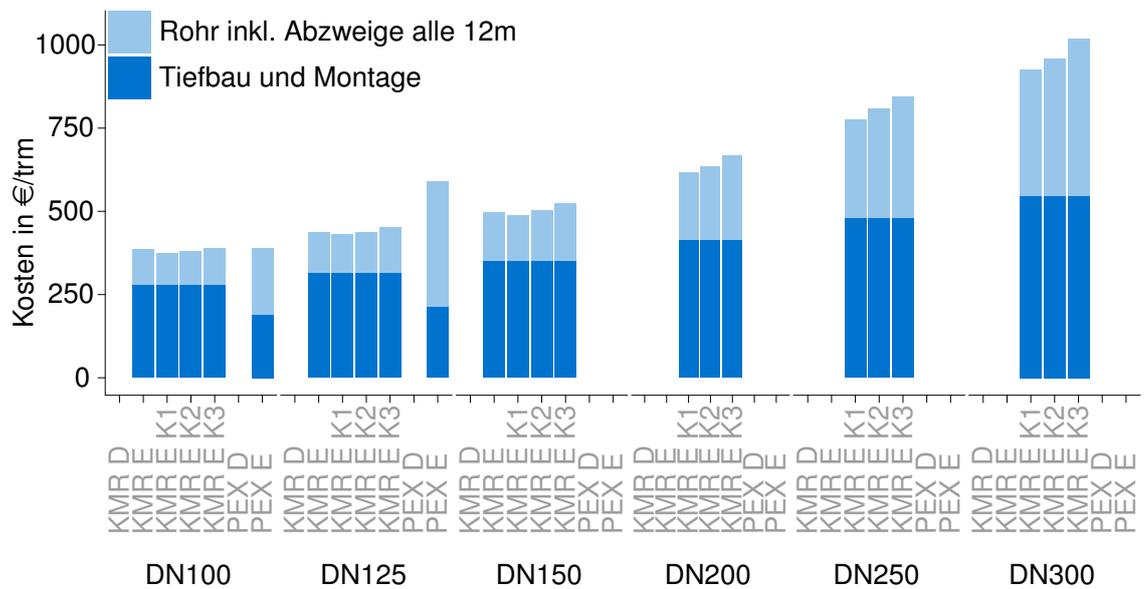


Abbildung 35 Kosten von Wärmenetzen, unbefestigte Oberflächen DN100 - DN300

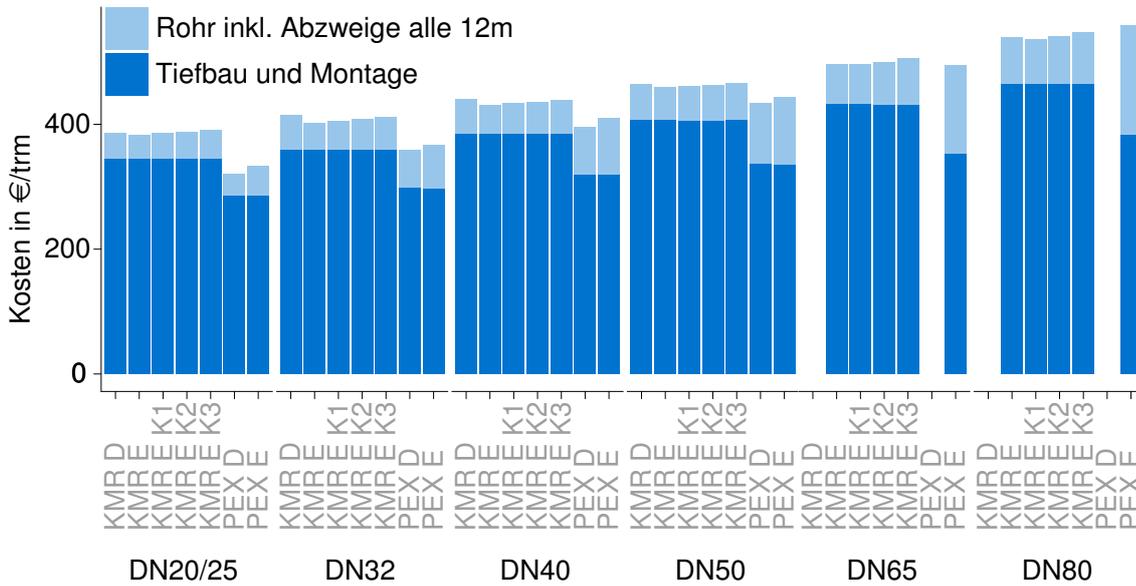


Abbildung 36 Kosten von Wärmenetzen, asphaltierte Oberflächen DN20 - DN80

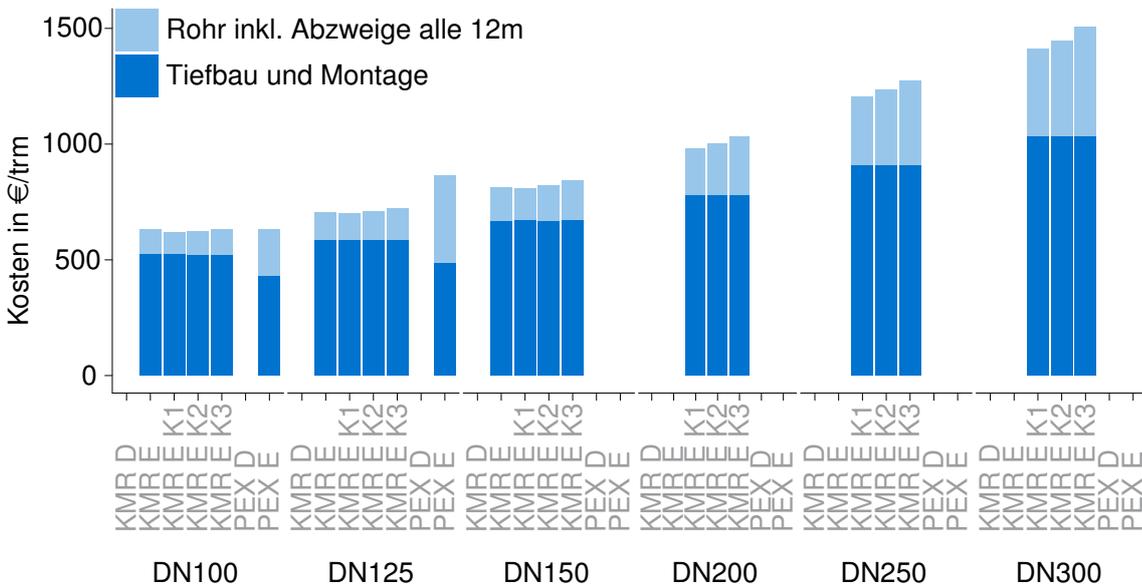


Abbildung 37 Kosten von Wärmenetzen, asphaltierte Oberflächen DN100 - DN300

2.2 Anwendung der Simulationssoftware rfWärme

In diesem Abschnitt wird anhand eines Beispielprojektes die Vorgehensweise bei der Arbeit mit rfWärme demonstriert. Als erster Schritt wird nach dem Öffnen des Programms ein neues Projekt angelegt. Hierzu wählt man unter Datei den Menüpunkt **Neu**. Nach Eingabe des Dateinamens Projekt1 werden, wie in Abbildung 38 dargestellt, eine Datei mit dem Namen **Projekt1.rfw** und ein Ordner **Projekt1** angelegt.

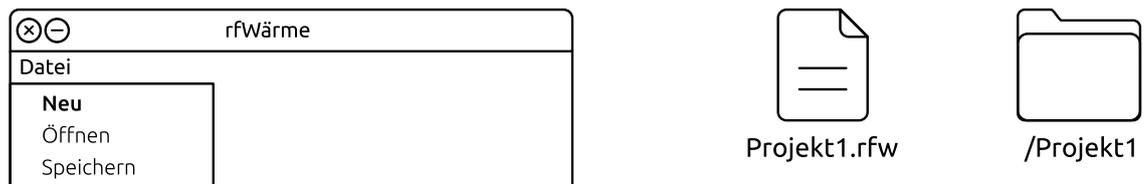


Abbildung 38 Anlegen eines neuen Projektes in rfWärme

In der Datei mit der Endung .rfw werden die wichtigsten Laufzeitvariablen gespeichert. Der gleichnamige Ordner beinhaltet die zur Berechnung erforderlichen GIS und CSV Dateien. Nach dem Anlegen eines neuen Projektes werden die Datei **rfLastprofile_SigLinDe.csv** aus Abschnitt 2.1.3 und die Datei **rfKlimaTagKW.csv** als Referenzklima Deutschland aus Abschnitt 2.1.4 vom Ordner /opt/rfWaerme in den aktuellen Projektordner /Projekt1 übertragen.

2.2.1 Initialisierung

Um die für die Berechnungen erforderlichen Dateien in das Projekt laden zu können, wird durch Anklicken des Buttons **Initialisieren** ein neues Fenster geöffnet (Abbildung 39).



Abbildung 39 Anlegen eines neuen Projektes in rfWärme

Die im Menü enthaltenen Buttons sind zu Beginn nicht alle anwählbar. Erst nach dem Anlegen einer neuen Datei wird der Punkt Initialisieren verfügbar (Abbildung 39). Nach erfolgter Initialisierung wird dieser Button wieder deaktiviert. Durch setzen eines Häkchens neben **Init** kann dieser Button nachträglich wieder aktiviert werden.

Mit dem Fenster Initialisierung (Abbildung 40) werden die zur Berechnung und Simulation erforderliche Daten geladen. Der erste Datensatz ist der GIS Layer Einspeiser. Dieser kann

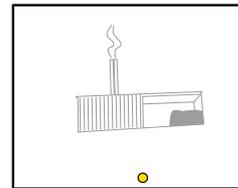


Abbildung 40 Importieren des Layers Einspeiser

sowohl im Shapefile [57] Format, als auch im Map Info Interchange Format [59] eingelesen werden. Hierzu wird der Button **Import** angeklickt und die entsprechende Datei gewählt. Wie schon in Abschnitt 2.1.5 beschrieben, benötigt dieser Punktlayer keine Attribute.

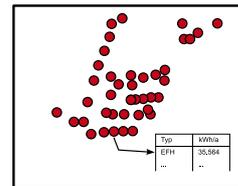


Abbildung 41 Importieren des Layers Abnehmer

Anders bei dem Punktlayer für die Abnehmerdaten: Hier ist es erforderlich die beiden Attribute Jahreswärmebedarf und Gebäudetyp bzw. Lastprofil mit einzulesen. Nach Anklicken des **Import** Buttons in Abbildung 41 öffnet sich ein neues Fenster, in welchem die Zuordnung der Layerattribute zu den beiden Variablen erfolgt. Im GIS Layer kann dadurch sowohl die Anordnung, als auch die Bezeichnung der beiden erforderlichen Attribute frei gewählt werden. Im Fenster **Abnehmerdatei auswählen (shp/mif)** werden in der rechten Spalte alle Attribute des einzulesenden Layers aufgeführt. Nun wird, wie in Abbildung 42 dargestellt, ein Attribut (hier: Gebäudetyp) ausgewählt. Die Zuordnung erfolgt durch Anklicken des zugehörigen Buttons **Wahl** (hier: unterer Button). Zur Überprüfung der korrekten Zuordnung wird die Zeilennummer (hier: 3) neben der Bezeichnung aufgeführt.

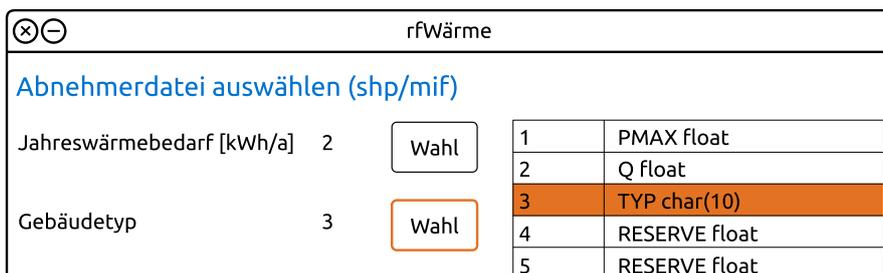


Abbildung 42 Zuordnung der Attribute des Layers Abnehmer

Als letzter GIS Layer wird die Netztrasse importiert (Abbildung 43). Hierzu ist ein Linienlayer, wie in Abschnitt 2.1.5 beschrieben, erforderlich.

Sollten bei dem zu untersuchenden Wärmenetz teilweise Bestandsleitungen enthalten sein, können in rfWärme die Bestandsdurchmesser berücksichtigt werden. Hierzu ist allerdings ein kleiner Workaround notwendig. Zuerst wird hier der Wärmenetzlayer eingelesen und alle wei-

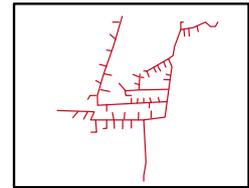
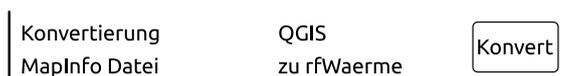


Abbildung 43 Importieren des Layers Netztrasse

teren Schritte bis inklusive Abschnitt 2.2.2 durchgearbeitet. Hierbei werden im Projektordner /Projekt1 die Dateien rfNetzTrasse.MIF und rfNetzTrasse.MID erzeugt. Diese können mit Hilfe der Software ogr2ogr ins Shapeformat umgewandelt werden (siehe Abschnitt 2.1.5). Hierin lassen sich mit QGIS [73] die Attribute verändern und abspeichern. Um nun für einzelne Trassenabschnitte die Durchmesser zu fixieren werden diese, wie in Abbildung 44 dargestellt, im Attribut **DU** (Einheit: mm) eingetragen und im zugehörigen Attribut **VorDim** von 0 auf 1 geändert. Dadurch bleibt, bei einer erneuten Dimensionierung nach Abschnitt 2.2.2, der zuvor eingestellte Wert erhalten.



	DU	VorDim
0	312.7	1
1	263.0	0

Abbildung 44 Konvertierung einer MapInfo Datei zu rfWärme

Der so veränderte GIS Layer im Shapeformat wird nun mit ogr2ogr wieder ins Map Info Interchange Format umgewandelt. Um diese Datei in rfWärme wieder einsetzen zu können, ist es noch erforderlich, sie zu bereinigen. Hierzu wurde eine Konvertierungsfunktion in das Fenster Initialisierung eingefügt (Abbildung 44). Durch Anklicken des Buttons **Konvert** kann die von ogr2ogr erstellte Datei ausgewählt und konvertiert werden. Mit den so bereinigten MIF/MID Dateien werden dann die im Projektordner enthaltenen Dateien ersetzt.



Abbildung 45 Download Klimadaten vom FTP-Server des DWD

Neben den GIS Layern ist zur Anwendung des Lastprofilverfahrens aus Abschnitt 2.1.3 ein Datensatz mit den täglichen Mitteltemperaturen eines Jahres notwendig. Hierzu ist in rfWärme eine Funktion enthalten, die es ermöglicht durch den Zugang auf den FTP Server des DWD Zugriff auf die Daten von 1091 Stationen zu erhalten. Ein Klick auf den Button **FTP** in Abbildung 45 wird das Fenster Stationen des Deutschen Wetterdienstes (Abbildung 46) geöffnet, in dem die aktuell verfügbaren Stationen nach ID sortiert aufgeführt sind.

Wird nun hier eine Station ausgewählt und das Fenster mit dem Button **OK** geschlossen, lädt rfWärme die Klimadaten in Form einer ZIP-Datei in den Projektordner und entpackt daraus die Datei mit den Temperaturen.

ID	Ort	Bundesland
00001	Aach	Baden-Württemberg
00003	Aachen	Nordrhein-Westfalen
00044	Großenkneten	Niedersachsen
00052	Ahrensburg-Wulfsdorf	Schleswig-Holstein
00061	Aiterhofen	Bayern

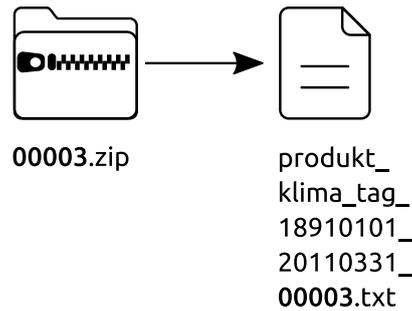


Abbildung 46 Auswahl der Station des DWD

Klimadatenatz der Eingangsdaten rfKlimaTagKW.csv vorhanden	<input type="button" value="DWD"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Energiedaten aus Episcopo	
Klimadatenatz für Berechnung/Simulation rfKlimaTag.csv nicht vorhanden	<input type="button" value="DWD"/>



Abbildung 47 Auswahl der Klimadateien

Um diese Datei verwenden zu können wird sie im Fenster **Initialisieren** nach Anklicken des Button **DWD** ausgewählt. Dieser ist zu Beginn nur für die Klimadaten zu Berechnung/Simulation verfügbar, weil erst einmal davon ausgegangen wird, dass die Energiewerte der Gebäude aus der Episcopo Studie (vgl. Abschnitt 2.1.2) stammen. Hierfür wird der vorhandene Klimadatenatz für das Referenzklima Deutschland verwendet. Sollen auch hier die vom DWD bezogenen Klimadaten verwendet werden, ist in Abbildung 47 das Häkchen zu entfernen, womit der **DWD** Button aktiviert wird und die entsprechende Datei produkt[...].txt gewählt wird.

Jahr	Heizgradtage [Kd/a]
1891	2362.3
1892	2424.8
1893	2177.5
1894	2101.1
1895	2517.2

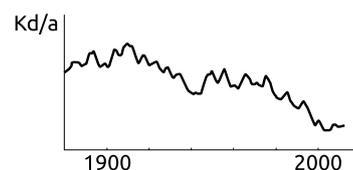


Abbildung 48 Auswahl der Heizgradtage nach VDI 3807

In dieser sind die Temperaturwerte mehrerer Jahre enthalten. Um bei der Wahl eines bestimmten Jahres einen Überblick zu erhalten, wird für jedes Jahr, wie in Abbildung 48 dargestellt, die zugehörige Heizgradtagszahl ausgegeben. Nach Auswahl eines Jahres wird aus den Daten die jeweilige Datei rfKlimaTag.csv bzw. rfKlimaTagKW.csv erzeugt und im Projektordner abgelegt.

Als letzter Datensatz ist noch eine Rohrtabelle in den Projektordner zu übertragen. Hierzu wurden aus den Daten in Abschnitt 2.1.7 vier unterschiedliche Dateien erzeugt. Diese sind im Ordner /opt/rfWaerme abgelegt und unterscheiden sich in starre und flexible Rohre, sowie in befestigter und unbefestigter Verlegeart.

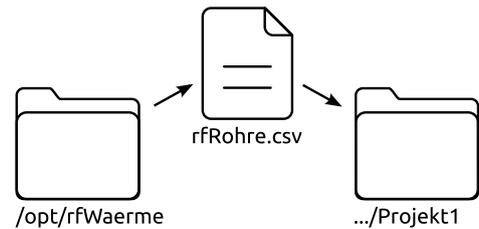


Abbildung 49 Laden der Rohrtabelle und des Lastprofils

Für die starren Rohre werden für alle Dimensionen die Daten KMR E K1-K3 verwendet. Bei den flexiblen Rohren übersteigen ab dem Durchmesser DN65 die Preise der flexiblen Rohre die der starren. Deshalb werden für die Dimensionen DN25 bis DN65 die Daten aus PEX E verwendet und ab DN80 mit den Daten KMR E K1-K3 aufgefüllt.

Über die Radiobuttons in Abbildung 49 können die Verlegeart und das Rohrmaterial ausgewählt werden. Durch den Button **Laden** wird die passende Datei unter dem Dateinamen rfRohre.csv in den Projektordner kopiert.

2.2.2 Dimensionierung

Nach erfolgreicher Initialisierung wird der Button **Dimensionieren** aktiviert (Abbildung 50).



Abbildung 50 Wahl des Menüpunktes Dimensionieren

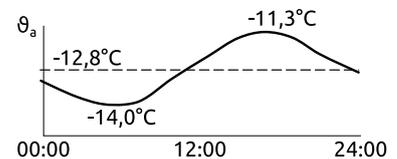


Abbildung 51 Wahl der Außentemperatur zur Auslegung des Wärmenetzes

Über diesen gelangt man in das Fenster Dimensionierung (Abbildung 51), in dem die erforderlichen Einstellungen erfolgen. Als erster Punkt wird die Auslegungstemperatur ausgegeben. Diese ist die niedrigste Tagesmitteltemperatur in der Datei rfKlimaTag.csv im Projektordner und entspricht somit dem kältesten Tag. Für die Berechnung der Auslegungsleistung nach Abschnitt 2.1.3 wird für den Wochentagsfaktor Montag und für den Stundenfaktor der Zeitraum von 6:00 bis 7:00 Uhr gewählt. In diesem Zeitraum sind die Stundenfaktoren für Wohn-

gebäude am höchsten. Mit diesen Werten wird je Wärmeabnehmer die Auslegungsleistung \dot{Q} berechnet.

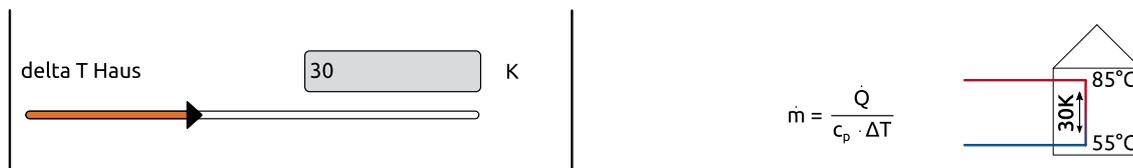


Abbildung 52 Temperaturdifferenz zur Auslegung des Wärmenetzes

Um mit der in Abbildung 52 dargestellten Funktion den Massenstrom \dot{m} berechnen zu können, wird hier die Temperaturdifferenz zwischen der Vorlauftemperatur und der minimalen Rücklauftemperatur am Abnehmer vorgegeben. Die Eingabe erfolgt entweder über die Textbox oder über den Schieber. Dieser kann sowohl mit der Maus, als auch per Pfeiltasten bewegt werden. Zu beachten ist hierbei, dass die Vorlauftemperatur am Abnehmer etwas unter der Vorlauftemperatur am Punkt der Netzeinspeisung liegt, da in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit ein Temperaturabfall auf Grund des Wärmeverlustes erfolgt. Die Rücklauftemperatur ist, besonders im Sommer, abhängig vom installierten System der Warmwasserbereitung. Hier sind im ungünstigen Fall über 60 °C möglich. Durch den Einsatz neuer Warmwassererwärmungsanlagen, wie z.B. nach Zeisberger [74, S. 68] kann die Rücklauftemperatur auch Werte unter 40 °C erreichen.

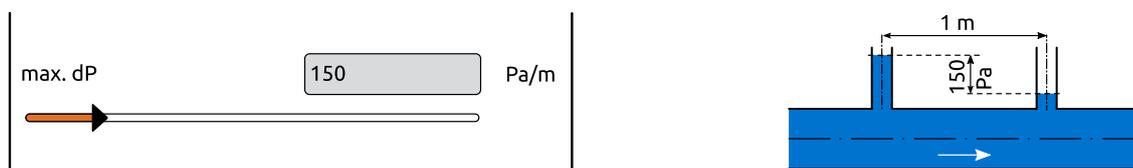


Abbildung 53 Maximaler Druckverlust im Rohr in Pa/m

Nach Berechnung des Massenstromes wird der durch die Strömung verursachte Druckverlust berechnet. Hierzu beginnt das Programm mit dem kleinsten Durchmesser in der Rohrtabelle **rfRohre.csv**. Wird hierbei der in Abbildung 53 abgefragte, längenbezogene Druckverlustwert überschritten, erfolgt im nächsten Schritt die Berechnung mit einer Dimension größer, bis der berechnete Wert unter dem Vorgabewert liegt oder die maximale Dimension erreicht wird.

Nach Dötsch et al. [36, A52] darf für Unterverteilungsleitungen bis DN150 die Strömungsgeschwindigkeit 2 m/s nicht überschreiten, weil sonst Strömungsgeräusche auftreten. Als Grenzwert für Hauptverteilungsleitungen von DN150 bis DN500 gelten maximal 3 m/s. In Tabelle 12 ergibt sich für Unterverteilungsleitungen ein maximaler Druckverlust von 267 Pa/m bei 2,0 m/s. Für Hauptverteilungsleitungen liegt dieser Wert bei 205 Pa/m. Je kleiner die größte Dimension im Netz, desto höher kann auch der maximale Druckverlust werden. Eine weitere Einschränkung ergibt sich auf Grund der Nenndruckstufe des Rohrmaterials. Für KMR bedeutet das üblicherweise PN16 also 16 bar (maximaler Druck). Bei rein theoretischer Betrachtung des Druckverlustes in der Rohrleitung wäre ein Netz mit 267 Pa/m Druckverlust und PN16 rechnerisch auf 5.990 m Rohrlänge begrenzt. Wegen der Vor- und Rücklaufleitung

Tabelle 12 längenbezogener Druckverlust in Pa/m für KMR Rohre

w	1,0 $\frac{m}{s}$	1,5 $\frac{m}{s}$	2,0 $\frac{m}{s}$
DN25	511	1.104	1.889
DN32	360	775	1.335
DN40	298	640	1104
DN50	218	466	803
DN65	160	339	587
DN80	129	274	476
DN100	94	199	347
DN125	71	154	267

w	1,0 $\frac{m}{s}$	2,0 $\frac{m}{s}$	3,0 $\frac{m}{s}$
DN150	57	210	460
DN200	41	152	332
DN250	31	116	252
DN300	25	94	205

entspreche das, ohne Berücksichtigung weiterer Drücke, einer maximalen Trassenlänge von knapp 3 km.

Zur überschlägigen Dimensionierung empfehlen Dötsch et al. [36, A48] den Druckverlust auf 100 Pa/m zu begrenzen. Als weitere Quelle zur Bestimmung des maximalen Druckverlustes bei der Rohrdimensionierung ist Manderfeld [70, S. 77 ff.] zu nennen. Hier bewegt sich der Wert zwischen 90 Pa/m und 150 Pa/m. In Abbildung 54 sind diese unterschiedlichen Werte visualisiert.

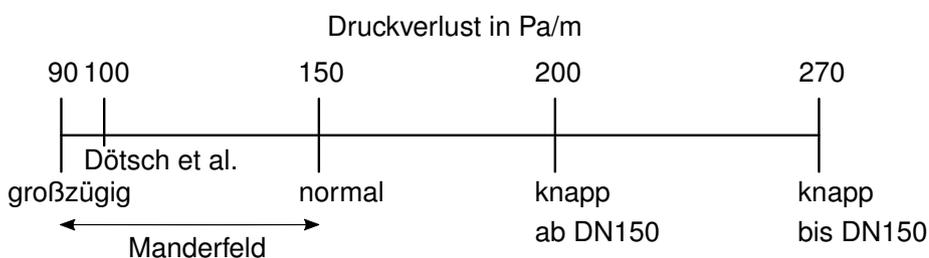


Abbildung 54 Typische Druckverlustwerte zur Netzdimensionierung

Wenn für einem Abnehmerlayer nicht von vornherein nur Gebäude gewählt wurden, bei denen ein Anschluss gewünscht wird und somit ein Anschlussgrad von 100 % (Abbildung 55) feststeht, ist es sehr unwahrscheinlich, dass sich alle möglichen Gebäudeeigentümer in Zu-

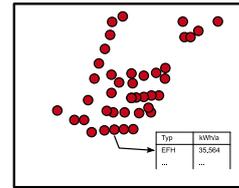
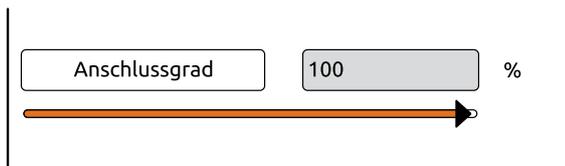


Abbildung 55 Anschlussgrad der vorhandenen Gebäude 100%

kunft auch an das Nahwärmenetz anschließen lassen. Nach Blesl [14, S. 172 f.] erreichen Wärmenetze im Ausbauzustand - bis auf den Siedlungstyp „Gewerbliche Sonderbauten / Dienstleistungsbauten“ mit 55 % - einen Versorgungsgrad von 80 %. Beim Siedlungstyp „Öffentliche Sonderbauten“ sind es sogar 100 %.

Im Projekt Iptingen wird nach Böhnisch et al. [75, S. 44 f.] von einem anfänglichen Anschlussgrad von 25 % ausgegangen, welcher sich innerhalb von sechs Jahren auf 60 % steigern lässt und im Endausbau nach 20 Jahren ca. 75 % erreichen wird. Die relativen Netzverluste (vgl. Abbildung 1) sinken in diesem Projekt von anfänglich 25,1 % nach sechs Jahren auf 15,1 % und nach 20 Jahren auf 14,5 %.

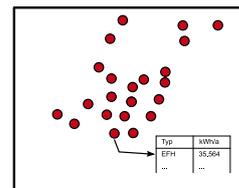
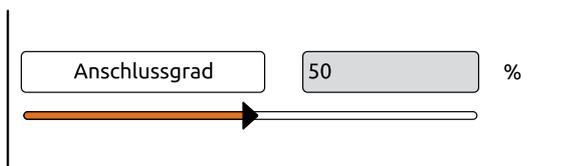


Abbildung 56 Anschlussgrad der vorhandenen Gebäude 50%

Um in rfWärme die Möglichkeit solcher Anschlussgradvarianten zu schaffen, ist ein Zufalls-generator eingefügt, welcher entsprechend des in Abbildung 56 eingestellten Wertes einen Teil der Abnehmer im Netz deaktiviert. Dies erfolgt jedoch erst nach Anklicken des Buttons **Anschlussgrad**.

2.2.3 Berechnung

Nach erfolgter Dimensionierung werden die beiden Buttons **Berechnung** und **Simulation** aktiviert. Über den Button **Berechnung** wird das gleichnamige Menü geöffnet (Abbildung 57).

Als erste Eingabe erfolgt hier die Vorlauftemperatur an der Heizzentrale (Abbildung 58).

Das nächste Feld (Abbildung 59) dient zur Eingabe der mindestens erforderlichen Vorlauftemperatur am Wärmeabnehmer. Dies bezieht sich hauptsächlich auf den Sommerfall. In der Regel ist der Leistungsbedarf im Sommer sehr viel geringer als im Winter. Diese Leistungsanpassung erfolgt im Normalfall über eine Reduktion des Massenstromes. Bei gleichbleibendem Rohrdurchmesser führt dies zu sehr langsamen Fließgeschwindigkeiten in Kombination mit einer starken Abkühlung des Vorlaufs. Zur Warmwasserbereitung wird jedoch eine Mindesteingangstemperatur benötigt. Wird diese nicht mehr erreicht, muss der Massenstrom erhöht

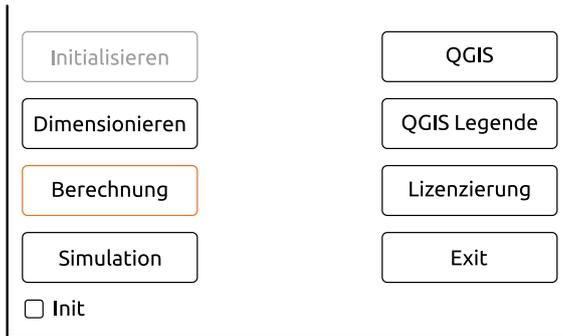


Abbildung 57 Wahl des Menüpunktes Berechnung

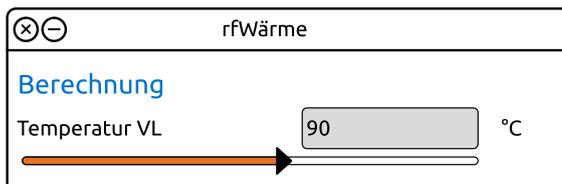


Abbildung 58 Wahl der Vorlauftemperatur am Wärmeerzeuger

werden, bis die Temperatur wieder einen ausreichenden Wert erreicht hat. In rfWärme erfolgt diese Anpassung iterativ über eine nach oben begrenzte Anzahl an Durchläufen. Diese Anzahl kann in Abbildung 61 unter **Rechenschritte** eingestellt werden. Im Feld darüber wird die maximal zulässige Abweichung eingestellt. Wird die maximale Anzahl Rechenschritte erreicht und liegt dann die Vorlauftemperatur noch immer außerhalb des Toleranzbereiches, wird mit dem letzten Anpassungswert weiter gerechnet.

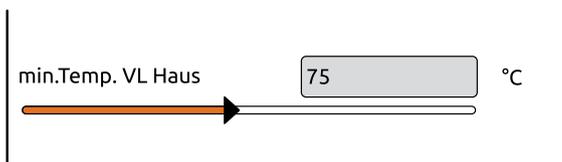


Abbildung 59 Wahl der mindestens erforderlichen Vorlauftemperatur am Verbraucher

Innerhalb dieser iterativen Berechnung dient der minimale Temperaturwert des Rücklaufs am Abnehmer aus Abbildung 60 als untere Begrenzung. Sollte diese unterschritten werden, wird auch hier der Massenstrom erhöht.

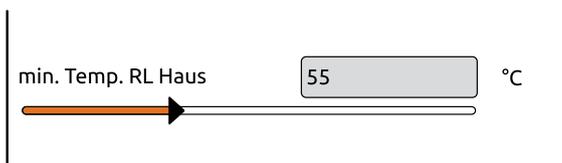


Abbildung 60 Wahl der kleinstmöglichen Rücklauftemperatur am Verbraucher

In Abbildung 62 sind nach Ramsaier [76, S. 22] beispielhaft für die Dimension DN80 eines KMR Rohres die Wärmeverluste unterschiedlicher Dämmklassen aufgezeigt. Durch die Wahl einer 2-fach verstärkten Dämmung (DK3) können bei DN80 gegenüber der Standard Däm-

Toleranz Temp Haus +-	<input type="text" value="1"/>	K
Rechenschritte	<input type="text" value="20"/>	

Abbildung 61 Toleranzparameter der iterativen Berechnung

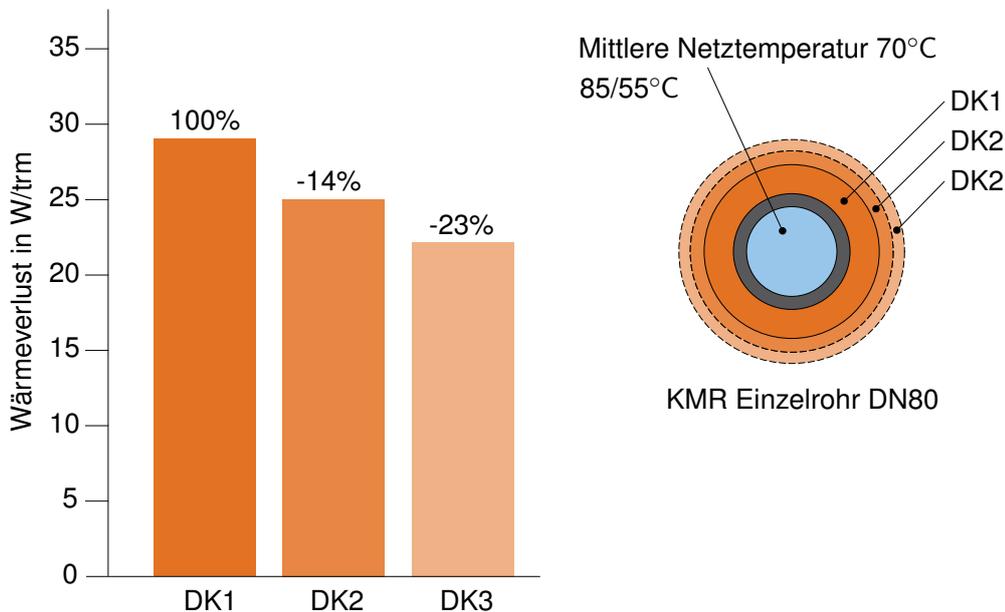


Abbildung 62 Vergleich Wärmeverluste unterschiedlicher Dämmklassen (Quelle: In Anlehnung an [76, S. 22])

mung (DK1) die Wärmeverluste um 23 % verringert werden. Die Mehrkosten liegen hierbei bei unter 5 %. Die Einstellung erfolgt im Berechnungsfenster unter dem Punkt Dämmklasse (Abbildung 63) per Radiobutton.

Dämmklasse	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3
------------	------------------------------------	-------------------------	-------------------------

Abbildung 63 Wahl der Dämmklasse des Leitungsnetzes

Die Berechnung des Druckverlustes im gesamten Leitungsnetz inklusive der Einbauten erfolgt zur Bestimmung des Pumpenergieaufwandes sowie der Betriebskosten für den Pumpbetrieb. Für alle Einbauteile, insbesondere die Wärmetauscher innerhalb der Gebäude, wird ein pauschaler Druckverlust im Eingabefenster (Abbildung 64) vorgegeben. Als Anhaltspunkt können die Technischen Vorschriften zur Fernwärmeversorgung der Energie Wasser Bern [77, S. 8] dienen. Hier wird der maximale Druckverlust von Gebäudeeintritt bis Gebäudeaustritt mit 1 bar vorgegeben.

Im zweiten Feld dieser Abbildung wird der Längenzuschlag für Einzelwiderstände (Bögen, Abzweige, etc.) des Rohrnetzes eingestellt. Als Richtwert kann für kleine Netze nach Gnüchtel [32, S. 30] der Wert 30 %, für größere Netze aus der Studie „Pluralistische Wärmeversorgung“ [78, S. 42] der Wert 20 % verwendet werden.

dP Wärmetauscher	<input type="text" value="1.0"/>	bar
Zuschlag dP Formstücke	<input type="text" value="30"/>	%

Abbildung 64 Einstellungen zur Druckverlustberechnung

Nachdem mit diesen Parametern der Druckverlust berechnet wurde, kann unter Verwendung des Pumpengesamtwirkungsgrades aus Abbildung 65 der elektrische Strombedarf ermittelt werden. Als Anhaltspunkt für die Wahl des Gesamtwirkungsgrades dienen die Herstellerdaten von Wilo [79, S. 23] aus Abbildung 66.

Wirkungsgrad Pumpe	<input type="text" value="60"/>	%
--------------------	---------------------------------	---

Abbildung 65 Gesamtwirkungsgrad der Netzpumpe

Wirkungsgrade bei Standard
Nassläuferpumpen (Richtwerte)

Wirkungsgrade bei
Trockenläuferpumpen (Richtwerte)

Pumpen mit Motorleistung P	η_{ges}	Pumpen mit Motorleistung P	η_{ges}
bis 100 W	ca. 5% - ca. 30%	bis 1,5 kW	ca. 30% - ca. 65%
100 bis 500 W	ca. 20% - ca. 50%	1,5 bis 7,5 kW	ca. 35% - ca. 75%
500 bis 2.500 W	ca. 30% - ca. 60%	7,5 bis 45,0 kW	ca. 40% - ca. 80%

Abbildung 66 Typische Gesamtwirkungsgrade von Netzpumpen (Quelle: In Anlehnung an [79, S. 23])

Die Berechnung dient dazu, eine Momentaufnahme einer Stunde im Jahr zu berechnen. Hierzu wurde nach Abschnitt 2.2.1 ein Klimajahr ausgewählt. In Abbildung 67 wird in diesem Jahr eine Stunde ausgewählt, in der die Berechnung erfolgt. Zur Orientierung werden die berechnete Erdreichtemperatur, die Lufttemperatur sowie die gewählte Stunde des Jahres angezeigt.

Erdreichtemperatur	8.8	°C
Lufttemperatur über 24h	12.2	°C
Stunde im Jahr	2261	

Abbildung 67 Wahl der Berechnungstunde

Nach erfolgreicher Berechnung werden die Ergebnisse übersichtlich in einem neuen Fenster (Abbildung 68) dargestellt. Im oberen Bereich der Tabelle werden die einzelnen Durchmesser mit zugehöriger Trassenlänge und Erstellungskosten aufgeführt. Dabei werden die Gesamtkosten der Trassenerstellung aufsummiert. Der mittlere Bereich zeigt die hydraulischen Werte Druckverlust und Massenstrom sowie die daraus berechneten Leistungsdaten (hydraulisch,

elektrisch) der Netzpumpe. Im unteren Bereich stehen nach den Trassenlängen (längster Weg und Gesamtlänge) die Leistungskennwerte. Hierbei wird unter dem Punkt Wärmeverkauf die Leistung angezeigt, welche bei den Anschlussnehmern abgenommen wird. Der absolute Wärmeverlust berechnet sich nach Abschnitt 2.1.6. Der relative Wärmeverlust ist das Verhältnis „Wärmeverlust absolut“ zu „Wärmeverkauf“.

di[mm]	Länge [trm]	Kosten [€]
27.3	2707	1044978
36	305	123985
41.9	104	45061
53.9	157	72217
69.7	164	81263

Gesamtkosten:	1381834	€
Druckverlust gesamt	1.1	bar
Massenstrom gesamt	1.31	kg/s
hyd. Pumpleistung	0.1441	kW
el. Pumpleistung	0.2402	kW
Längste Trasse	736	trm
Länge Trasse gesamt	3447	trm
Wärmeverkauf	146	kW
Wärmeverlust absolut	67	kW
Wärmeverlust relativ	46	%

Exit

Abbildung 68 Darstellung der Berechnungsergebnisse

2.2.4 Grafische Auswertung

Im Hauptmenü besteht unter dem Button **QGIS Legende** die Möglichkeit eine QGIS qml Datei zu erstellen (vgl. [80, S. 157 f.]). Mit dieser Datei können im GIS Programm QGIS die beiden Layer rfNetzTrasse und rfPunkte auf Basis der Netztemperaturen eingefärbt werden. Die Darstellung orientiert sich an jener in der Dissertation von Köcher [31, S. 133].

Im Fenster **Legende erzeugen** (Abbildungen 70 und 71) ist der Farbverlauf mit den eingestellten Teiltemperaturen dargestellt. Diese können im Feld Anzahl Teilfarben erhöht bzw. reduziert werden. Als obere und untere Grenze werden die maximale und die minimale Temperatur eingegeben. Darunter befindet sich eine Auswahl an Radiobuttons. Hier wird eingestellt, ob die qml Datei für den Layer rfNetzTrasse verwendet wird (Trasse) oder für den Layer rfPunkte (Punkte). Daneben ist die Auswahl der entsprechenden Temperatur (Vorlauf/Rücklauf).



Abbildung 69 Wahl des Menüpunktes Berechnung

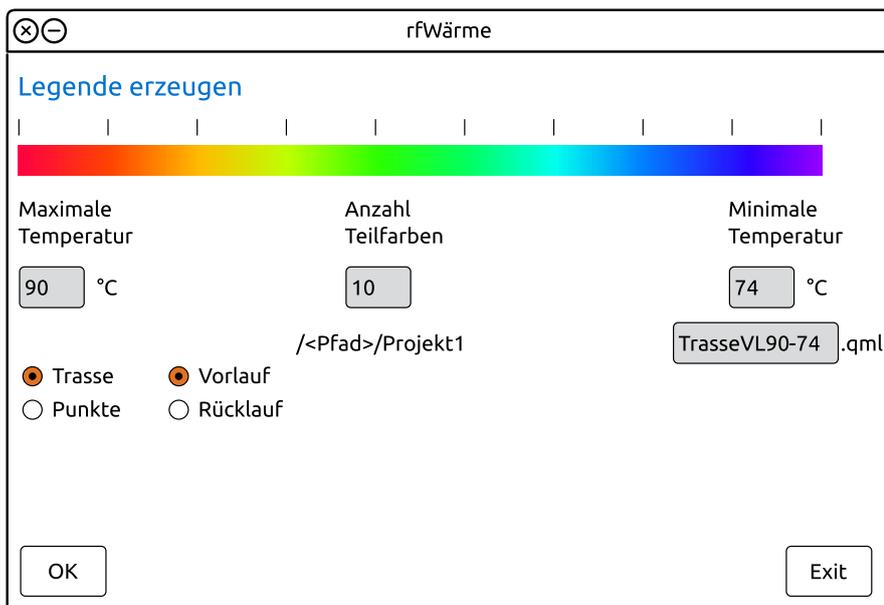


Abbildung 70 Erzeugen einer Legende des Layers rfNetzTrasse in QGIS

Aus diesen Eingaben wird automatisch ein passender Dateiname (z.B. TrasseVL90-74.qml) vorgeschlagen. Dieser kann jederzeit verändert werden.

Zur Darstellung in QGIS wird der Button **QGIS** in Abbildung 69 angeklickt. Daraufhin öffnet sich das Programm QGIS und es werden alle GIS Layer im aktuellen Projektverzeichnis geladen. Da diese Layer keine Definition des Koordinatenbezugssystem bzw. Koordinatenreferenzsystem (KBS) beinhalten, wird vor dem Öffnen jeder Datei das KBS abgefragt.

Im Layerfenster sind alle referenzierten Layer aufgelistet. In den zugehörigen Auswahlboxen sind zu Beginn alle Layer durch ein Häkchen aktiviert und werden somit im Kartenfenster dargestellt. Hier werden nun alle Layer, bis auf rfPunkte und rfNetzTrasse, durch Entfernen der Häkchen deaktiviert.

Um nun die Temperaturen auf den jeweiligen Layern farbig darzustellen, wird durch Rechtsklick auf den Layernamen ein Menü aktiviert. Hierin befindet sich der Unterpunkt **Einstellungen**.

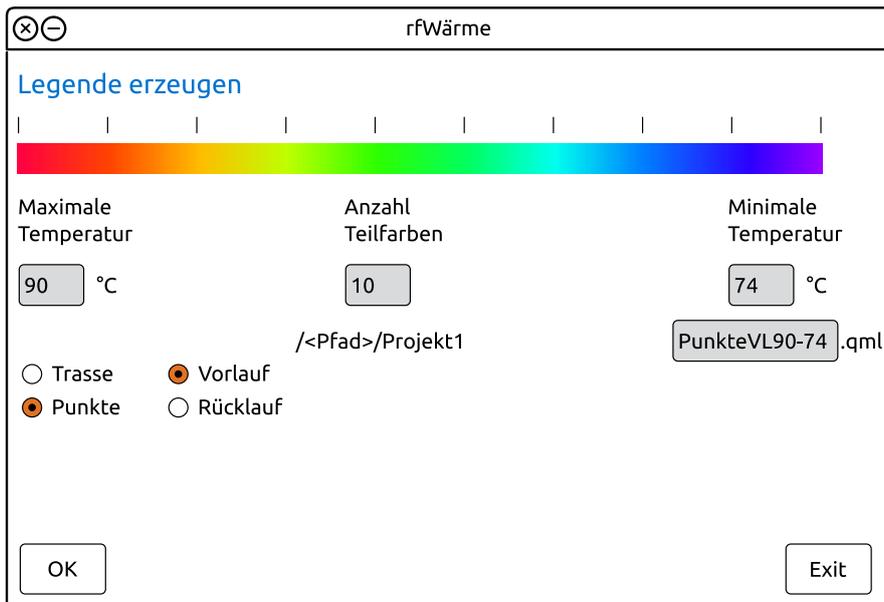


Abbildung 71 Erzeugen einer Legende des Layers rfPunkte in QGIS

Über diesen gelangt man in ein neues Fenster, in dem die entsprechende qml-Datei erzeugt werden kann.

Zu beachten ist, dass die für den Punktlayer erzeugten qml Dateien auch nur auf den Layer rfPunkte angewendet werden können und die für den Trassenlayer nur auf rfNetzTrasse.

Die farbige Darstellung (Abbildungen 72 und 73) dient in erster Linie dazu, das Netz zu analysieren bzw. zu optimieren. Besonders nach der Berechnung im Sommerfall können in der Karte Anschlussnehmer mit langen Leitungslängen und geringer Wärmeabnahme ermittelt werden. Diese zeichnen sich in der Regel durch eine hohe Rücklauftemperatur bzw. einen starken Temperaturabfall im Vorlauf aus.

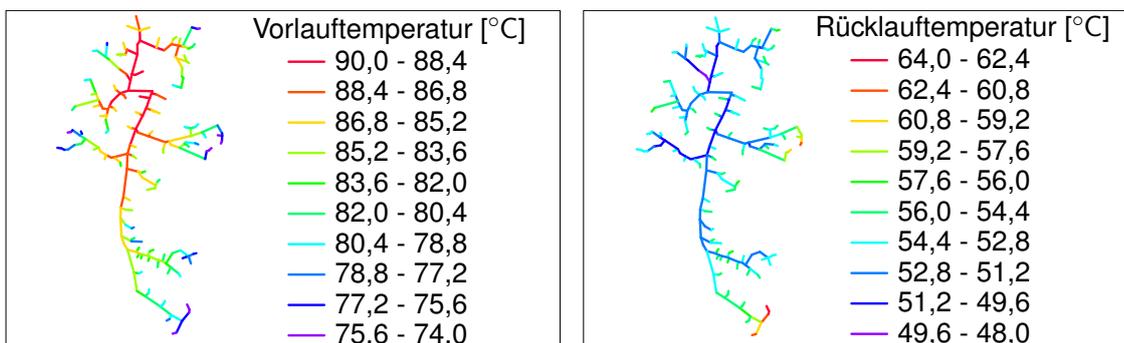


Abbildung 72 Einfärben der Vorlauf- und Rücklauftemperaturen im Layer rfNetztrasse

2.2.5 Simulation

Im Hauptmenü wird unter dem Button **Simulation** (Abbildung 74) ein gleichnamiges Fenster geöffnet. Hierin werden die bereits in Abschnitt 2.2.3 vorgenommenen Einstellungen zur Berechnung aufgeführt. Der Button **Eingabe** ermöglicht es, Änderungen in den Berechnungs-

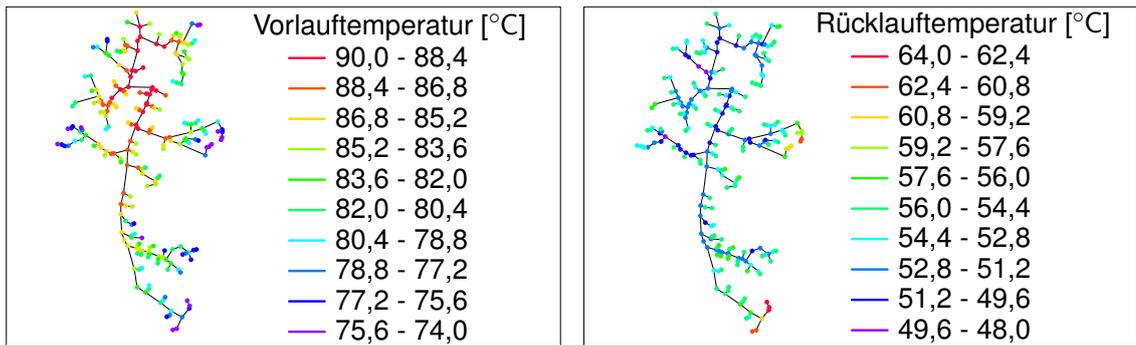


Abbildung 73 Einfärben der Vorlauf- und Rücklauftemperaturen im Layer rfPunkte

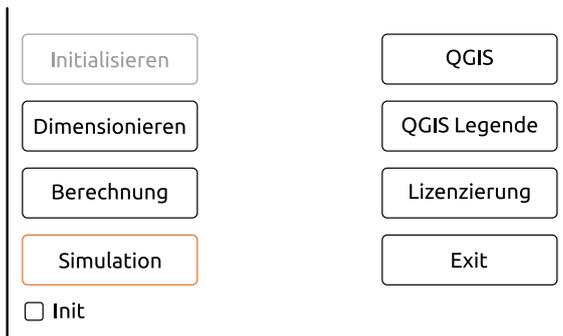


Abbildung 74 Wahl des Menüpunktes Simulation

einstellungen vorzunehmen. Besonders zu erwähnen ist hier die Anzahl der Rechenschritte bzw. Iterationsschritte innerhalb einer Stunde, wobei eine hohe Anzahl zwar zu präziseren Ergebnissen führt, jedoch die Simulation stark bremsen kann.

In der Mitte dieses Fensters werden neben dem Button **Sim** die Werte aus den Klimadaten-sätzen (vgl. Abschnitt 2.1.4) angezeigt. Nach Anklicken dieses Buttons öffnet sich ein weiteres Fenster **Simulation Display** (Abbildung 75). Darin wird in erster Linie der Dateiname für das Ergebnis angegeben.

Um die Simulationsdauer zu verkürzen, ist es möglich den Rechenaufwand auf mehrere Prozessoren bzw. Rechner aufzuteilen. Hierzu wird in die Box **root** ein Häkchen gesetzt. Dadurch ist es möglich, die Start- und Endstunde der Simulation zu bestimmen. Nun wird der Simulationsprozess aufgeteilt und entweder in mehreren Versionen von rfWärme oder auf mehreren Rechnern parallel geöffnet. Jeder Prozess hat hier seinen eigenen Simulationszeitraum. Bei dieser Art zu Simulieren ist es wichtig, dass alle Berechnungsparameter übereinstimmen und der Zufallsgenerator zur Bestimmung des Anschlussgrades nicht mehr erneut verwendet wird.

Gestartet wird die Simulation über den Button **Start**. Während der Simulation wird für jede Stunde das Netz berechnet. Die aktuellen Berechnungsergebnisse, sowie der Rechenfortschritt werden für jede Stunde angezeigt. Hierbei steht „Leistung zu“ für die am Einspei-

sepunkt dem Netz zugeführte Leistung. Die „Leistung ab“ zeigt die den Wärmeabnehmern zugeführte Leistung. Die Differenz der beiden ist die „Leistung Verlust“ und zeigt den Wärmeverlust im Netz an. Die beiden Temperaturen „Temp. Vorlauf“ und „Temp. Rücklauf“ sind am Einspeisepunkt gemessen. Der Wert „Temp. Luft Ø“ entspricht dem Wert der Tagesdurchschnittstemperatur über 24 Stunden. Unter „Temp. Erdreich“ wird die berechnete Temperatur des Erdreichs ausgegeben.

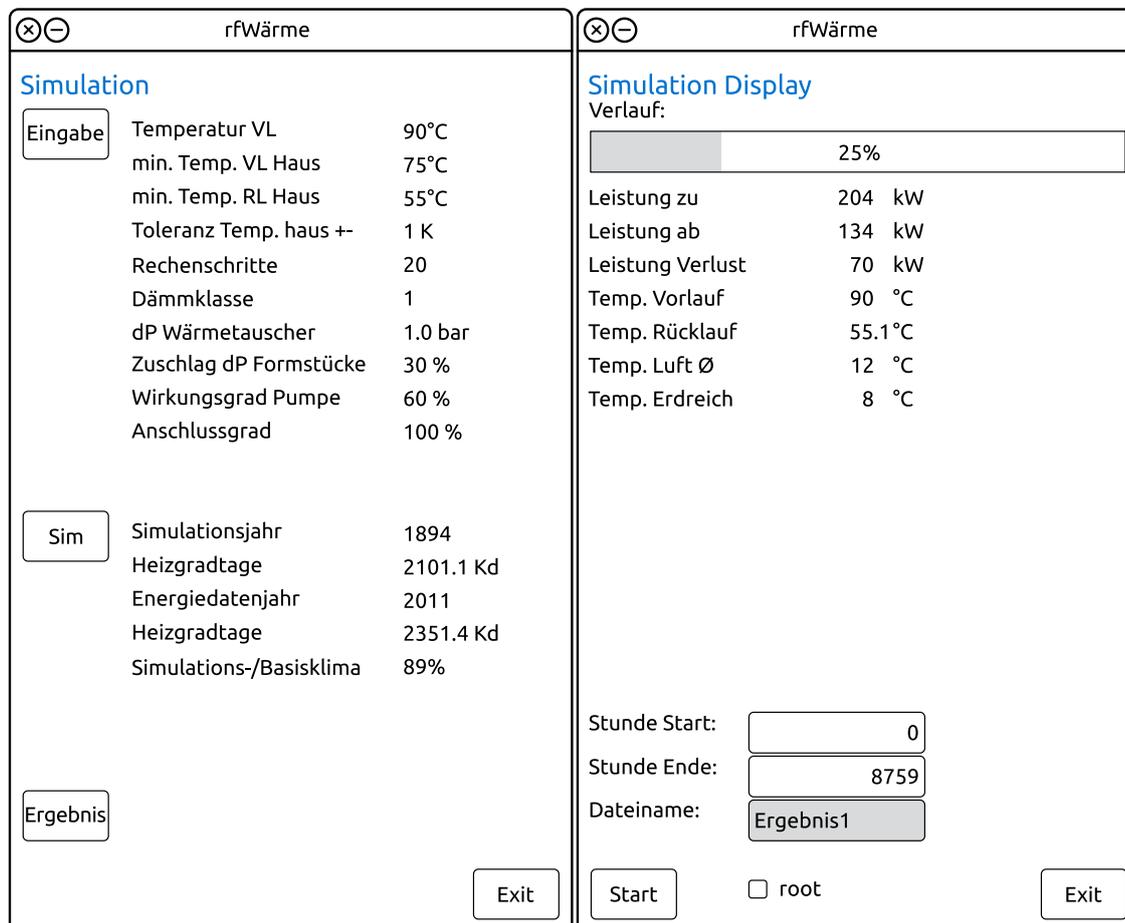


Abbildung 75 Starten einer Simulation

Die verschiedenen Ergebnisdateien werden am Ende in ein Projekt kopiert und später unter **Ergebnisauswertung** gemeinsam eingelesen.

2.3 Validierung der Simulationssoftware rfWärme

Die Software rfWärme wird anhand der Fernwärmeversorgung in Neueckerode validiert. Dieses Wärmenetz wurde von Jagnow und Wolff im Rahmen des DBU-Projekts Neuerkerode mit dem Förderkennzeichen 25241 intensiv untersucht und dokumentiert [41].

2.3.1 Abnehmer und Zentrale

An das Fernwärmenetz sind laut dem Bericht von Zeichner et al. [81, S. 9 ff.] 50 Gebäude angeschlossen, wovon zwei Gebäude nicht eindeutig verortet werden konnten und deshalb

im Validierungsmodell fehlen. Weil der Anteil des Wärmebedarfs dieser beiden Gebäude am Gesamtwärmebedarf lediglich 1,6 % beträgt, werden die Auswirkungen auf das Ergebnis als vernachlässigbar eingeschätzt.

Die einzelnen Gebäude weisen zum Teil sehr unterschiedliche Nutzungen auf. Diese werden berücksichtigt, indem jedem Gebäude ein passendes Lastprofil nach Abschnitt 2.1.3 zugewiesen ist. Explizit werden hier die Nutzungsarten nach Ahlers et al. [49, S. 86 ff.] verwendet. Bei den Gebäuden mit Warmwasserbereitung über die Fernwärme beträgt die Ausprägung 33, wohingegen für die Gebäude ohne Warmwasserbereitung die Ausprägung 34 verwendet wird.

Die originalen Messdaten des Wärmebedarfs aller Gebäude stammen aus den Jahren 2001 bis 2008. Zur Verbesserung der Vergleichbarkeit wurden diese Daten klimabereinigt. Das Verfahren ist im „Abschlussbericht 02: Mediengrunddaten“ [82, S. 13 ff.] beschrieben. Es stützt sich auf das Langzeitklima von Magdeburg. Hierbei wird zwischen witterungsabhängigen und witterungsunabhängigen Anteilen unterschieden, weshalb eine Rückrechnung der bereinigten Wärmebedarfswerte aus dem Bericht „Nahwärmenetzkarten Neueckerode“ [81, S. 9 ff.] nicht möglich ist. Deshalb werden in der Simulation zur Berechnung der Kundenwerte die Klimadaten des Jahres 1972 mit 2.613 Kd nach Abschnitt 2.3.3 verwendet. Die Abweichung zwischen simuliertem und originalem Gesamtwärmebedarf beträgt so weniger als ein halbes Prozent.

In Abbildung 76 ist der Abnehmerlayer durch die gelben Punkte ersichtlich. Dieser Layer beinhaltet die klimabereinigten Jahreswärmebedarfswerte der Gebäude und die dazu passenden Lastprofilbezeichnungen.

2.3.2 Netztrasse

Das Wärmenetz entstand zum überwiegenden Teil in den 1970er (1.101 trm) und 1980er (448 trm) Jahren. In den 1990ern wurde das Netz um 737 trm erweitert. Im Jahr 2009 wurde ein weiteres Gebäude mit 87 trm an das Netz angeschlossen [81, S. 19 ff.]. Für die Simulation wird eine eigens an die Rohrdaten aus dem Bericht „Nahwärmenetzkarten Neuerkerode“ [81, S. 19 ff.] angepasste Datei rfRohre.csv verwendet.

Die Wärmenetzgeometrie ist in QGIS als Linienlayer auf Basis einer Openstreetmapkarte und gemäß der Karte aus dem Bericht „Hydraulische Optimierung des Wärmenetzes“ [83, S. 15] nachgebildet. Die originalen Längen und Nenndurchmesser der Teilstrecken wurden auf das Berechnungsmodell übertragen, so dass die Darstellung in Abbildung 76 nur die Struktur, jedoch nicht die wahren Längen zeigt. Ebenso wie im Original sind die drei Teilnetze hierin unterschiedlich eingefärbt.

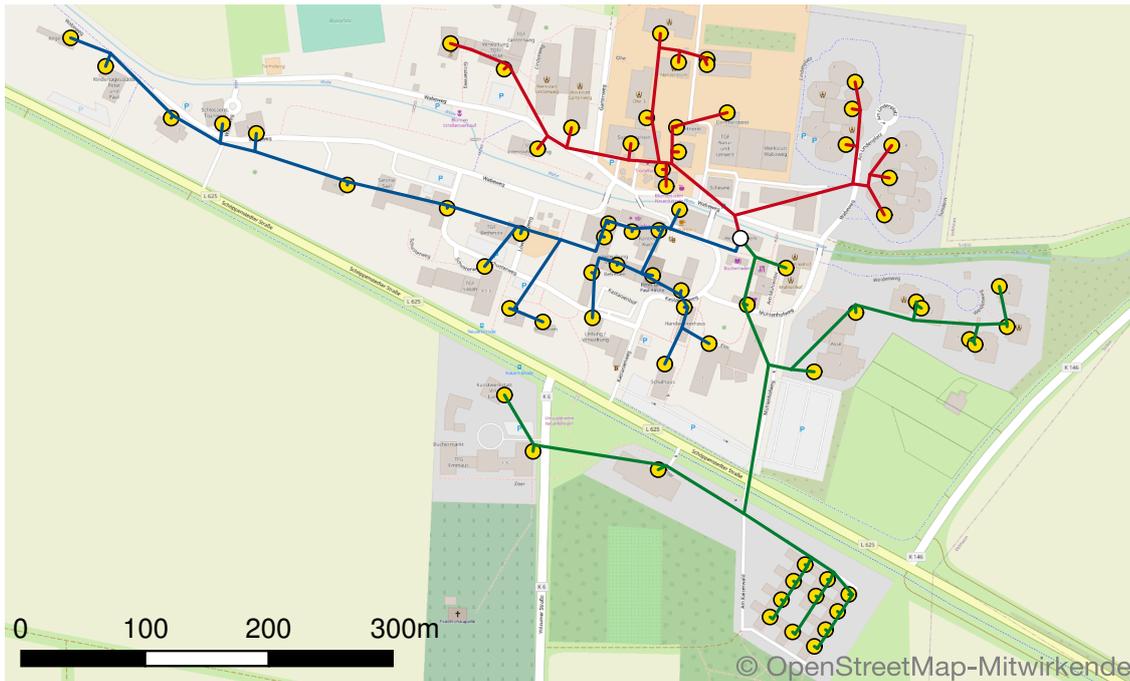


Abbildung 76 Trassenplan Neueckerode (Quelle: In Anlehnung an [81, S. 19 ff.], Karte [84])

2.3.3 Klimadaten

Für die Simulation ist es wichtig, geeignete Klimadaten zu verwenden. Die nächstgelegene Klimastation des Deutschen Wetterdienstes befindet sich, wie in Abbildung 77 dargestellt, ca. 16 km nordwestlich von Neueckerode in Braunschweig (Breite 52,2914 / Länge 10,4465) und hat die Bezeichnung „Messstation 662“. Für die weiteren Berechnungen werden die Klimadaten¹⁰ von dieser Station verwendet. Wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben dienen die Werte des Jahres 1972 zur Berechnung der einzelnen Kundenwerte. Die Simulation selbst bezieht sich auf den Zeitraum vom 01.04.2007 bis 31.03.2008 [82, S. 13].



Abbildung 77 Distanz DWD Messstation 662 und Neueckerode (Quelle: In Anlehnung an [85])

¹⁰ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/historical/ (aufgerufen am 30.10.2020)

2.3.4 Netztemperaturen

Zur Anpassung der Temperaturen in der Simulation wird diese in 22 diskrete Schritte zerlegt. So besteht die Möglichkeit, die Temperaturverläufe aus dem Diagramm in Abbildung 78 (auf Basis von Jagnow [86, S. 22]) in rfWärme nachzubilden. Neben den Vorlauftemperaturen aus der Zentrale werden die Temperaturen der gelben Linie in Abbildung 78 als minimale Temperatur des Vorlaufs der Gebäude (vgl. Abbildung 59) und die Temperaturen der hellblauen Linie als minimale Temperatur des Rücklaufs der Gebäude (vgl. Abbildung 60) in der Simulation verwendet.

Die hellgraue Punktwolke zeigt die Rücklauftemperaturen an der Zentrale aus den Ergebnissen der Simulation. Diese liegen gleichmäßig um ca. 3 K über der dunkelblauen Kurve von Jagnow. Diese Kurve basiert auf einer Schätzung nach den Messwerten von Juli 2007. Betrachtet man die beiden Diagramme in der Quelle [86, S. 6], welche den Zeitraum vom 24.6.2007 bis 13.8.2007 abdecken, so lässt sich der Mittelwert mit 73 °C ablesen. Die Rücklauftemperaturen aus der Simulation passen in den Sommermonaten mit diesem Wert gut zusammen. Zudem weisen die Simulationsdaten des Rücklaufs einen gleichmäßigen Abstand zu den Kurven nach Jagnow auf. Dies belegt die gute Übereinstimmung der Simulation mit den realen Werten.

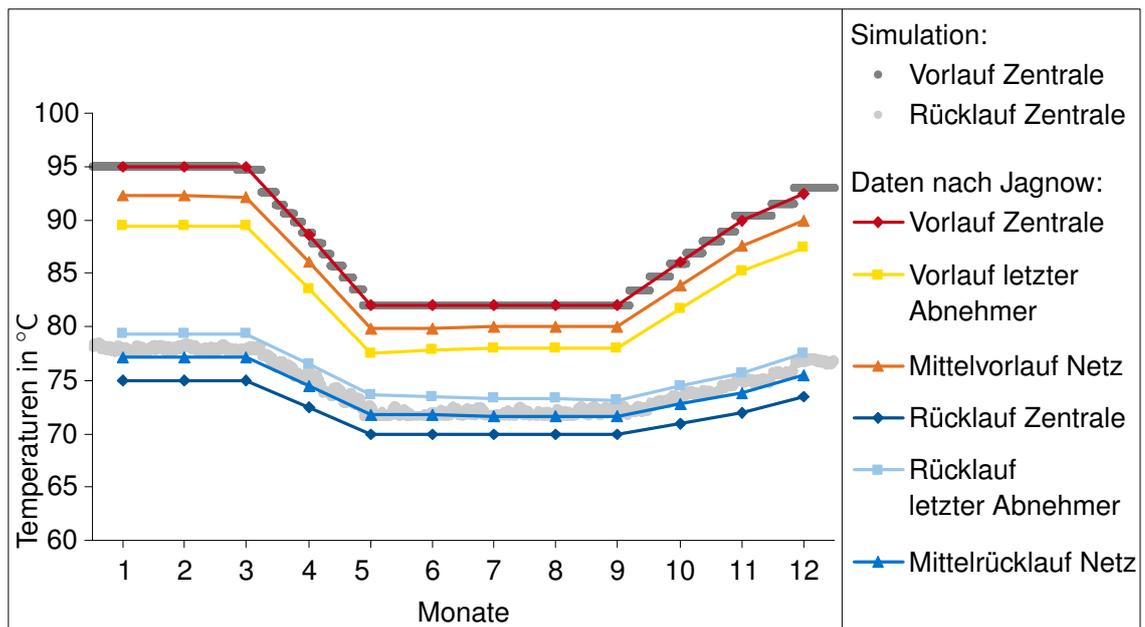


Abbildung 78 Netztemperaturen Nahwärme Neueckerode (Quelle: In Anlehnung an [86, S. 22])

2.3.5 Auswertung

Der im Zeitraum vom 01.04.2007 bis 31.03.2008 gemessene Gesamtwärmebedarf aller an das Fernwärmenetz angeschlossenen Gebäude beträgt 8.520 MWh. Die gemessenen Wärmeverluste des Netzes summieren sich im selben Zeitraum auf 2.089 MWh. Hierin enthalten sind auch Wärmeverluste in Höhe von 30 MWh, die durch das Aufheizen des Nachspeisewassers auf Grund von Undichtigkeiten im Netz entstehen [87, S. 37].

Im Balkendiagramm in Abbildung 79 sind diese Werte im unteren Balken dargestellt. Der obere Balken zeigt die Ergebnisse der Simulation. Diese unterscheiden sich kaum von den gemessenen Werten. Wie schon in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, weicht die abgenommene Energiemenge leicht von der simulierten ab. Aus der Simulation ergeben sich 1.976 MWh Netzwärmeverluste. Zählt man hierzu die Verluste aus den Leckageverlusten des Netzwassers hinzu, ergeben sich die im oberen Balken dargestellten 2.006 MWh. Die Verluste selbst sind als schmaler dunkelblauer Abschnitt am rechten Rand eingetragen der Balken. Die Simulation unterschätzt die Wärmeverluste um lediglich 4 %. Dies kann als ausreichend genau bewertet werden.

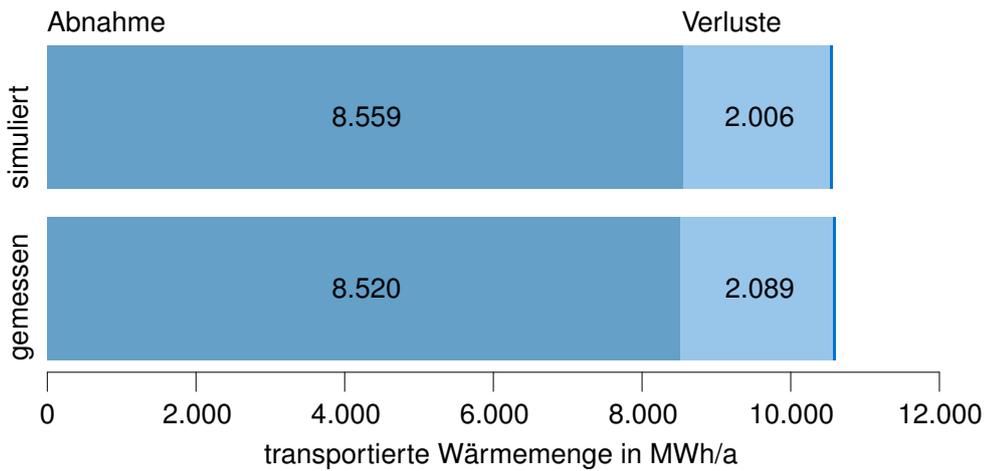


Abbildung 79 Wärmebilanz Nahwärme Neueckerode (Quelle: In Anlehnung an [87, S. 37])

3. Algorithmus zur Bestimmung des Wärmeverlustes

In diesem Abschnitt wird ein Algorithmus zur Berechnung der Wärmeverluste eines beliebigen Wärmenetzes entwickelt. Die Berechnung erfolgt anhand der Eingangsparameter: Gebietsfläche, Anzahl zu versorgender Gebäude und Gesamtwärmebedarf dieser Gebäude.

3.1 Übersicht

Die schematische Darstellung in Abbildung 80 zeigt die einzelnen Schritte des Algorithmus.

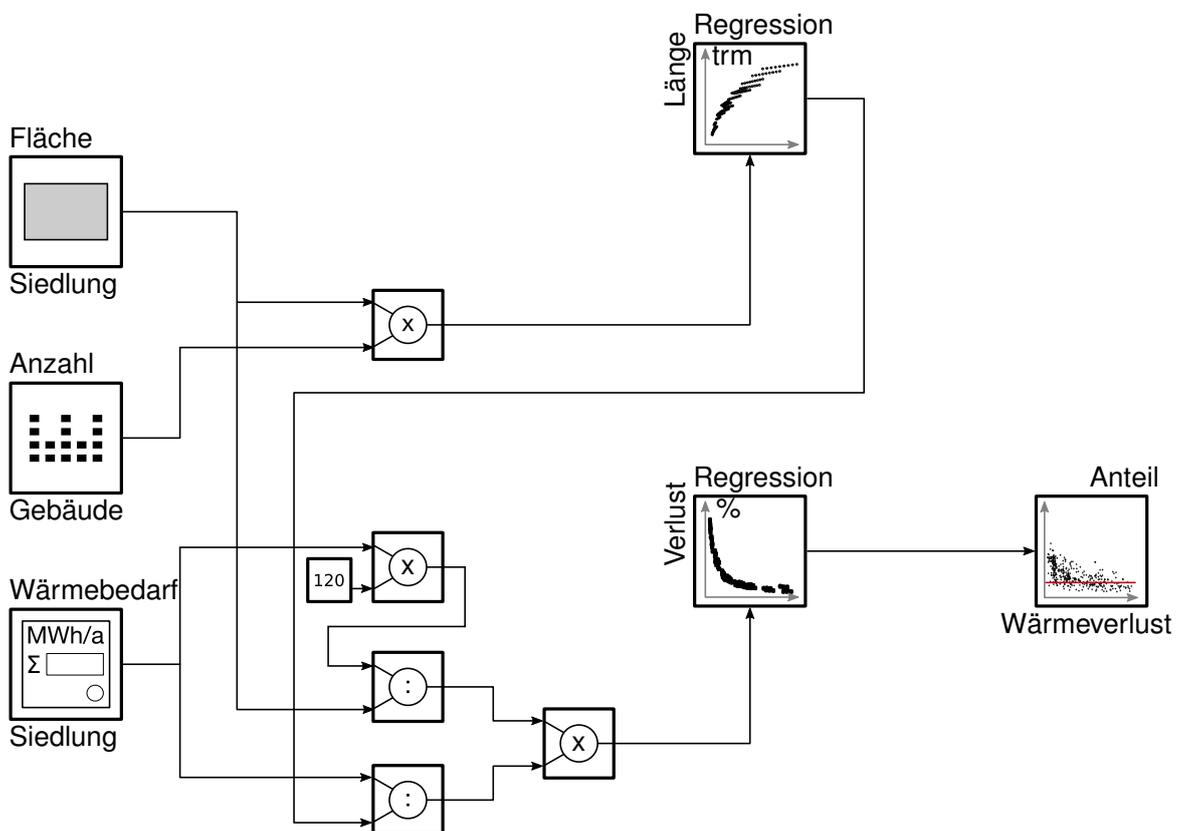


Abbildung 80 Schematische Darstellung des Algorithmus

Kernstück des Algorithmus sind zwei Regressionsfunktionen. Zum einen wird über die Fläche (A) und die Anzahl der Gebäude (n) die Trassenlänge (L) bestimmt. Zum anderen erfolgt aus dem Wärmebedarf aller Gebäude in der Siedlung und der zuvor bestimmten Trassenlänge der prozentuale Wärmeverlust. Dieser bezieht sich auf die abgenommene Wärmemenge.

3.2 Modellbildung synthetische Siedlung

Zur Bildung von Daten, mit welchen die Regression erfolgen kann, wird eine synthetische Siedlung modelliert und anschließend mit Hilfe von Parametern variiert. Über diese Variationen werden 67.770 Datensätze mit den drei Parametern: $A \cdot n$ und L erzeugt.

3.2.1 Gebäudemodell

Um die durchschnittliche Gebäudegrundfläche zu ermitteln, wird auf mehrere Statistiken zurückgegriffen. Aus den Angaben der deutschen Pfandbriefbanken nach Statista [88] bewegt sich die durchschnittliche Wohnfläche von Eigenheimen zwischen 138 m^2 für ländliche Kreise und 150 m^2 für Großstädte. Der Mittelwert für die Wohnfläche wird mit 144 m^2 berechnet. Der Großteil der Gebäude, besonders der Einfamilienhäuser, hat zwei Vollgeschosse (vgl. Bundesamt für Statistik (Schweiz), Statista [89]). Deshalb wird der Mittelwert 144 m^2 halbiert. Zur Umrechnung von Wohnfläche auf Gebäudegrundfläche wird diese durch den Faktor 0,75 geteilt um die Konstruktionsflächen zu berücksichtigen. Die resultierende Gebäudegrundfläche beträgt 96 m^2 . Weil Gebäudegrundflächen in der Regel rechteckig und nicht quadratisch sind, wird das Gebäudemodell auf die Maße 8 m breit und 12 m lang festgelegt. Dies ergibt 96 m^2 und gleicht somit den Werten aus der Statistik.

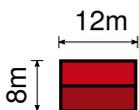


Abbildung 81 Typisches Einfamilienhaus als Gebäude der synthetischen Siedlung

3.2.2 Grundstücksmodell

In Deutschland beträgt, nach Angaben der deutschen Pfandbriefbanken, veröffentlicht durch Statista [90], die durchschnittliche Grundstücksfläche in Metropolen 482 m^2 , in Großstädten 498 m^2 , in Umlandgemeinden 632 m^2 und in ländlichen Kreisen 759 m^2 . Der arithmetische Mittelwert hieraus errechnet sich zu 593 m^2 . Für das Grundstücksmodell wird dieser auf 600 m^2 aufgerundet und kann somit über 30 m Länge und 20 m Breite dargestellt werden.

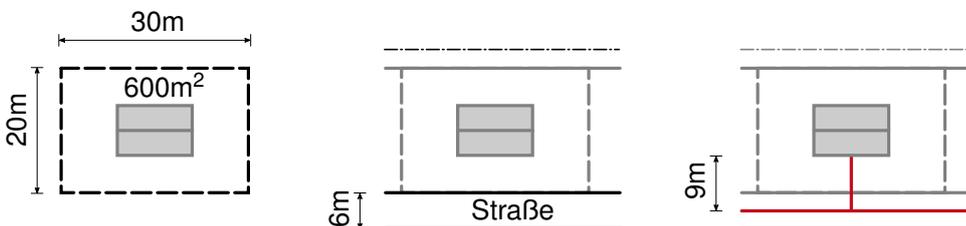


Abbildung 82 Entwicklung des Standardgrundstücks der synthetischen Siedlung

Wie in Abbildung 82 dargestellt, grenzen zwei Grundstücke horizontal aneinander. Vertikal werden sie durch eine 6 m breite Straße getrennt. Die Straßenbreite wird in Anlehnung an die Richtlinie FGSV 200: „Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen RAS06“ [91, S. 43] gewählt. Hier wird in Bild 28 mit dem Titel: „Empfohlene Querschnitte für die Typische Entwurfssituation Quartierstraße“ der Wert 12 m für die kleinste Straßenbreite vorgegeben. Diese

Breite wird im synthetischen Siedlungsmodell zu je 6 m den Grundstücken zugeteilt. In der Straßenmitte findet die Erschließung durch das Wärmenetz statt. Wegen der mittigen Lage des Gebäudes im Grundstück, beträgt die Länge der Hausanschlussleitung 9 m.

3.2.3 Siedlungsmodell

Im weiteren Schritt werden nun die einzelnen Grundstücke aus Abbildung 82 inklusive ihrer halben Straßenanteile regelmäßig aneinandergefügt (5 horizontal, 4 vertikal). Die so entstandene Basisvariante (Abbildung 83) hat eine Siedlungsfläche von 15.600 m² bei 20 Gebäuden.

Basisvariante 15.600 m², 20 Gebäude und 528 trm Wärmenetz

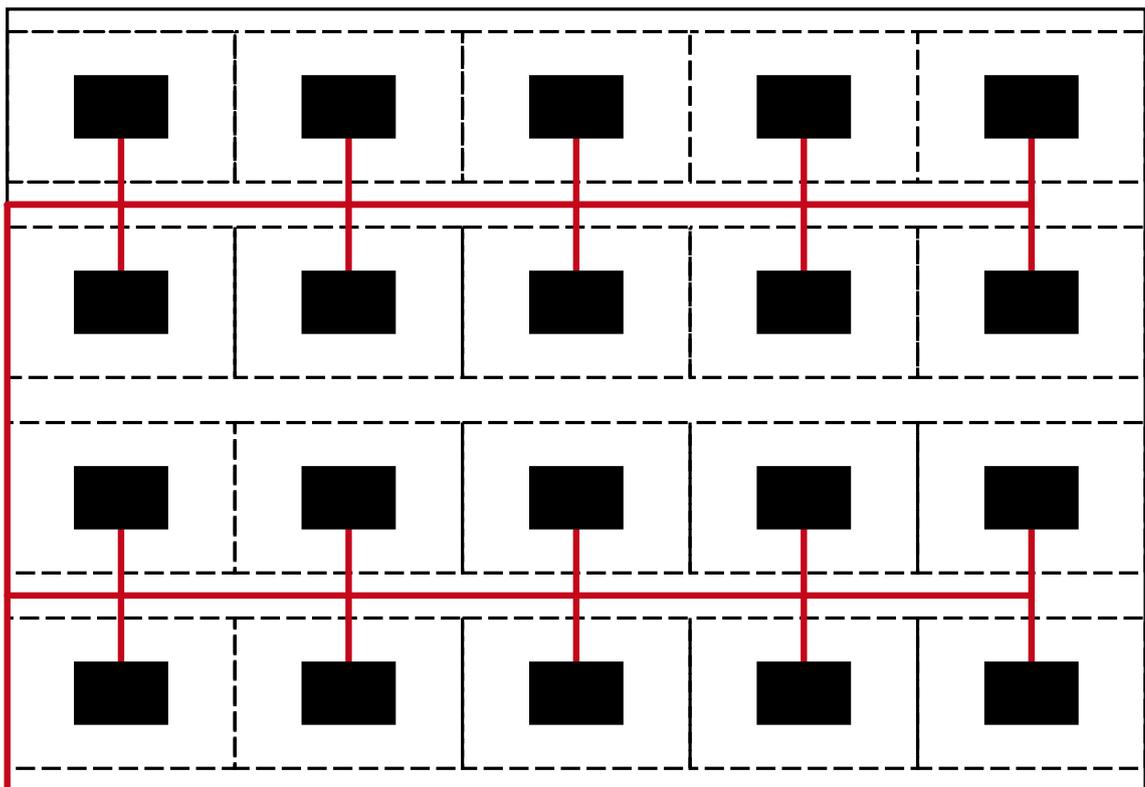


Abbildung 83 Standardvariante der synthetischen Siedlung

Von der linken unteren Ecke aus wird das Wärmenetz vertikal bis zur oberen Verbindungsstraße, die zwischen den beiden oberen Gebäudereihen liegt, geführt. In horizontaler Richtung erfolgt die Erschließung der Gebäude in jeder zweiten Verbindungsstraße. Mit den jeweils 9 m langen Gebäudeanschlussleitungen entsteht in dieser Basisvariante ein Wärmenetz mit 528 trm Länge.

3.2.4 Variationen

Für die Regressionsanalyse ist es erforderlich, diese Basisvariante zu variieren, um eine Vielzahl an Datenpunkten zu generieren. Hierzu werden drei unterschiedliche Variationsmöglichkeiten miteinander verknüpft.

Die erste Variation betrifft die Größe der Siedlungsfläche bei gleichbleibender Gebäudeanzahl. Diese wird gesteuert über den **Flächenfaktor fA**, welcher für das Vielfache der Siedlungsfläche aus der Basisvariante steht (15.600m²). In Abbildung 84 ist dargestellt, wie dieser Faktor beispielhaft von 0,5 bis 3 variiert wird.

Ebenso ist in Abbildung 84 die Variation der Gebäudeanzahl dargestellt. Diese wird über den **Faktor n** bestimmt. Wie in der Abbildung ersichtlich, werden hierzu jeweils Stück für Stück die zweite und die vierte Spalte an Gebäuden entfernt, um so weiter das Wärmenetz in der Fläche abspannen zu können. Das Reduzieren der Gebäudeanzahl bildet in diesem Modell die in der Praxis auftretenden unterschiedlichen Anschlussdichten nach. Wie schon in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, gibt Blesl [14, S. 172 f.] für Siedlungen im Endausbau einen Anschlussgrad von 80 % an. Deshalb bewegt sich die Gebäudeanzahl zwischen 12 und 20, was einem Anschlussgrad zwischen 60 % und 100 % entspricht. Im Mittel liegt dieser dann bei 80 %, wie von Blesl [14, S. 172 f.] angegeben.

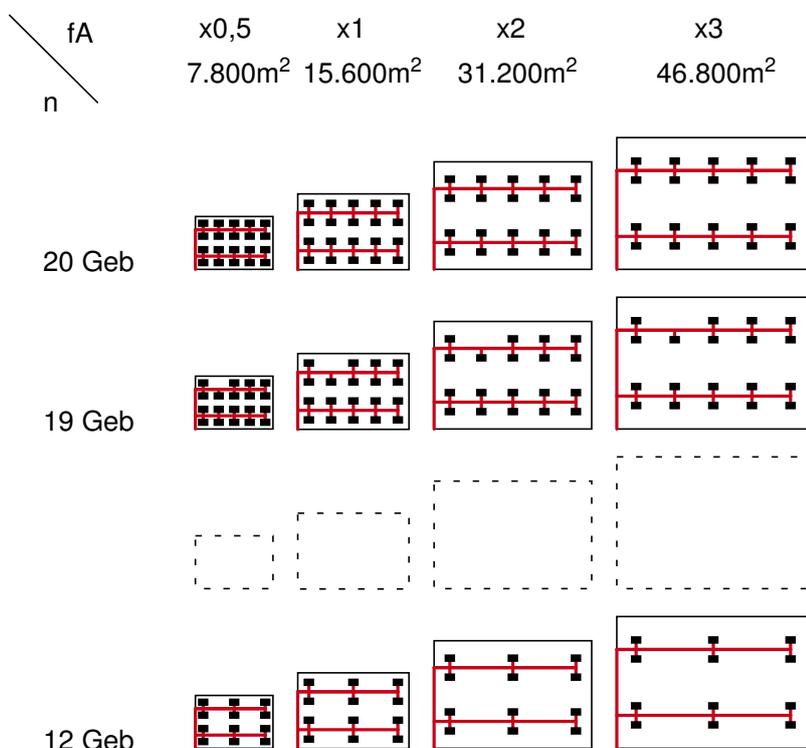


Abbildung 84 Variation der Dichte in der synthetischen Siedlung

Die weitere Variation betrifft die Gesamtgebietsfläche. Um auch große Siedlungen mit einzubeziehen, wird die einzelne Siedlung, wie in Abbildung 85 dargestellt, inklusive der Gebäudeanzahl und der Trassenlängen mit dem **Multiplikator x** vervielfältigt. Diese Vervielfältigung erfolgt in ganzzahligen Schritten.

Wohingegen die Variation der Siedlungsfläche in ganzzahligen Prozentwerten von 50 % bis 300 % erfolgt. Durch diese Vorgehensweise entstehen noch mehr Datensätze, welche in der Folge zu besseren Regressionsergebnissen führen sollen.

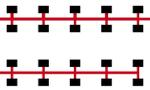
26	27	28	29	30
21	22	23	24	25
16	17	18	19	20
11	12	13	14	15
6	7	8	9	10
	2	3	4	5

Abbildung 85 Variation der Anzahl in der synthetischen Siedlung

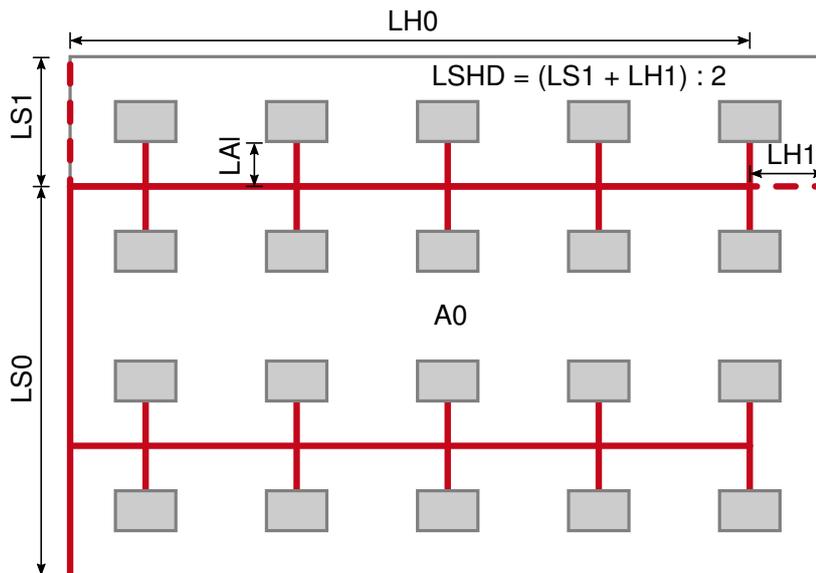
Die beschriebenen Variationsverfahren sind über Schleifen so mit einander verknüpft, dass jede Variation mit jeder anderen durchgeführt wird. Die Variantenbildung erfolgt automatisch über eine, in der Programmiersprache Python geschriebene, Anweisung. Diese ist in Anhang A abgedruckt. Das hierzu erforderliche mathematische Modell kann der schematischen Darstellung in Abbildung 86 entnommen werden. Die gestrichelten beiden roten Linien stellen hierin die Wärmenetzverbindungen zu den Nachbarsiedlungen dar. Wegen der nahezu gleichmäßigen Verteilung der Siedlungsstücke in Abbildung 85 werden die unterschiedlichen Längen der vertikalen Verbindung **LS1** und der horizontalen Verbindung **LH1** gemittelt und als **LSHD** bezeichnet.

Die Gegenüberstellung der spezifischen Siedlungsflächen je Gebäude in Tabelle 13 zeigt, dass hier die Dichten des Siedlungsmodells die Bandbreite der Dichten nach Blesl [14, S. 142] abdecken und an den Rändern jeweils noch ein wenig darüber hinausgehen. Mit diesem Vergleich wird die Realitätsnähe der Siedlungsmodellierung aufgezeigt.

3.2.5 Korrelationsanalyse Siedlungen

Die zuvor in diesem Abschnitt gezeigte Methode führt zum Streudiagramm in Abbildung 87. Aus der Darstellung kann schon optisch entnommen werden, dass es sich hierbei um einen nichtlinearen Zusammenhang handelt. Zum rechnerischen Nachweis der Stärke dieses nichtlinearen Zusammenhanges wird in der Korrelationsanalyse der Spearman'sche Korrelationskoeffizient verwendet.

Diese Korrelationsanalyse soll nun aufzeigen, inwiefern die beiden Variablen X und Y miteinander in Wechselbeziehung stehen, bzw. korrelieren. In diesem Verfahren wird der Spearman'sche Korrelationskoeffizient nach Fahrmeir et al. [92, S. 133 ff.] berechnet. In einem



- m: Anzahl Gebäude Basisvariante $A_0 = 15.600\text{m}^2$
 n: Anzahl Gebäude $LH_0 = 135\text{m}$
 x: Anzahl Kopien $LS_0 = 78\text{m}$
 fA: Skalierfaktor Fläche $LAI = 9\text{m}$
 $n = x \cdot m$ $LSHD = 20,5\text{m}$
 $A = x \cdot fA \cdot A_0$
 $L = (2 \cdot (fA^{0,5}) \cdot LH_0 \cdot x + (fA^{0,5}) \cdot LS_0 \cdot x + n \cdot LAI) + (fA^{0,5}) \cdot LSHD \cdot (x-1)$

Abbildung 86 Berechnungsgrundlage zur Variation der synthetischen Siedlung

Tabelle 13 Vergleich Siedlungstypologie mit synthetischem Siedlungsmodell (Quelle: Daten aus [14, S. 142])

Siedlungstypen nach Blesl	$\frac{\text{m}^2}{\text{Geb.}}$	Siedlungsmodell fA	$\frac{\text{m}^2}{\text{Geb.}}$
		0,5	390
ST9	436	0,6	468
ST4	522	0,7	546
ST3ab	643	0,8	624
ST2	795	1,0	780
ST1	1.305	2,0	1.560
		3,0	2.340

ersten Schritt werden die Werte aus $A \cdot n$ als x_i bezeichnet, der Größe nach geordnet und mit einem Rang $rg(x_i)$ versehen. Die Tabelle 14 zeigt dies am Beispiel der ersten fünf Werte. Ebenso wird mit den Werten der Wärmenetzlängen verfahren: Diese werden als y_i bezeichnet, der Größe nach geordnet und mit einem Rang $rg(y_i)$ versehen. In Tabelle 15 sind auch hierfür wieder beispielhaft die ersten fünf Werte dargestellt.

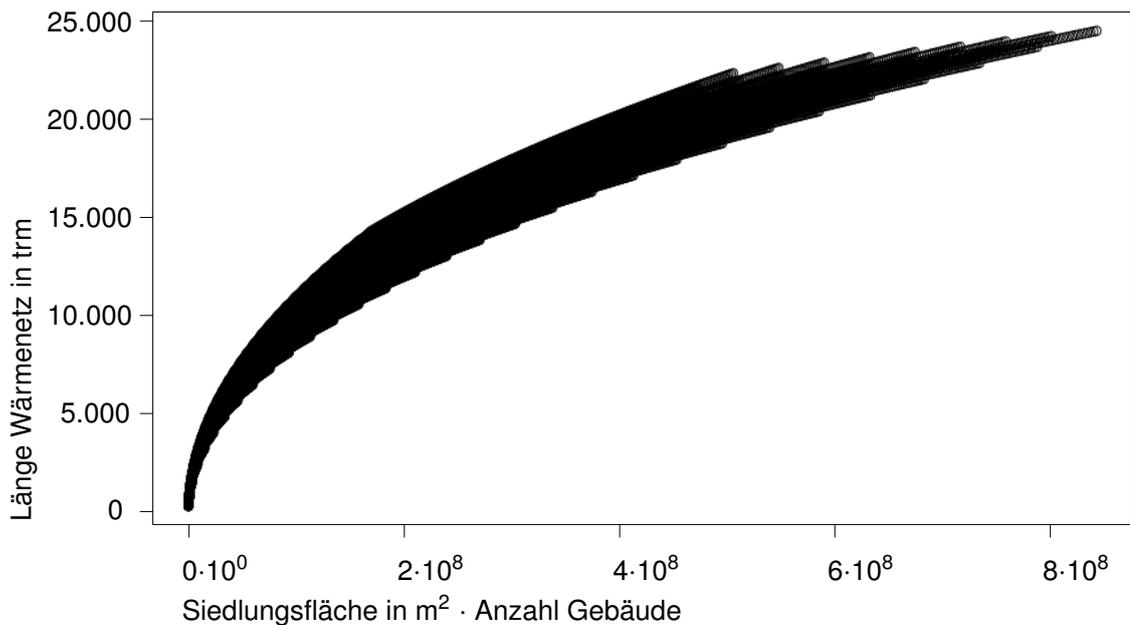


Abbildung 87 Streudiagramm Siedlungsfläche · Anzahl Gebäude und Netzlänge

Tabelle 14 Auszug Datentabelle Siedlungsfläche · Anzahl Gebäude und Rang

x_i	93.600	95.472	97.344	99.216	101.088	...
$rg(x_i)$	1	2	3	4	5	...

Tabelle 15 Auszug Datentabelle Wärmenetzlänge und Rang

y_i	300	303	304	307	308	...
$rg(y_i)$	1	2	3	4	5	...

Sind innerhalb der Variablen gleiche Werte vorhanden, so wird wie in Tabelle 16 dargestellt der Rang als Durchschnittsrang vergeben. Hierzu wird aus den Rängen, welche die Werte belegen, das arithmetische Mittel berechnet und allen Werten als Rang zugewiesen. In diesem Auszug betrifft es die Ränge 34 - 36.

Zugewiesen wird das arithmetische Mittel $(34 + 35 + 36) / 3 = 35$.

Tabelle 16 Bildung von Durchschnittsrängen

x_i	120.120	121.680	121.680	121.680	122.304	...
$rg(x_i)$	33	35	35	35	37	...

In Abbildung 88 sind die beiden Ränge $rg(x_i)$ und $rg(y_i)$ als Streudiagramm dargestellt. Hier wird der starke lineare Zusammenhang deutlich. Verglichen mit der Abbildung 3.12 in Fahrmeir et al. [92, S. 135 ff.], deutet dieses Diagramm auf einen Spearman'schen Korrelationskoeffizienten nahe dem Wert 1 hin.

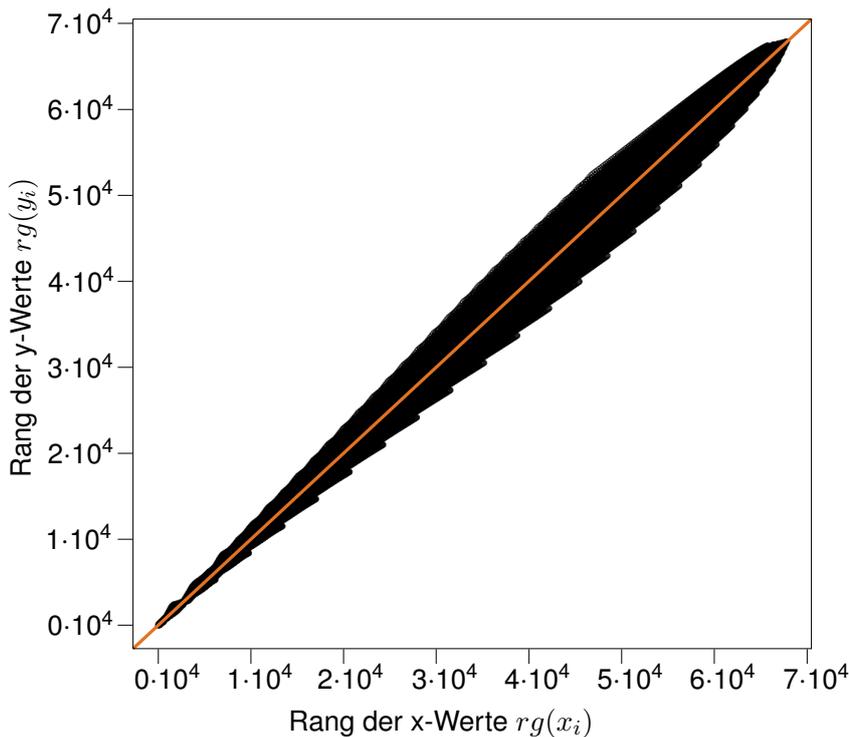


Abbildung 88 Streudiagramm aus Rängen $rg(x_i)$ und $rg(y_i)$

Die rechnerische Lösung des Spearman'schen Korrelationskoeffizienten erfolgt nach Gleichung 18 [92, S. 135].

$$r_{sp} = \frac{\sum (rg(x_i) - \bar{rg}_X)(rg(y_i) - \bar{rg}_Y)}{\sqrt{\sum (rg(x_i) - \bar{rg}_X)^2 \sum (rg(y_i) - \bar{rg}_Y)^2}} \quad (18)$$

Hierbei werden die Mittelwerte der beiden Ränge \bar{rg}_X und \bar{rg}_Y nach den Gleichungen 19 und 20 berechnet [92, S. 134].

$$\bar{rg}_X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n rg(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i = (n + 1)/2 \quad (19)$$

$$\bar{rg}_Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n rg(y_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i = (n + 1)/2 \quad (20)$$

Um die 67.770 Wertepaare aus der synthetischen Siedlung in Abschnitt 3.2 bewältigen zu können, wird im Weiteren mit der statistischen Programmiersprache R und der zugehörigen Softwareumgebung RStudio [93] gearbeitet.

Wird nun hiermit der Spearman'sche Korrelationskoeffizient für den gesamten Datensatz be-

rechnet, ergibt sich der Wert $r_s = 0,9963$. Dieser weist eine sehr hohe Korrelation der beiden Werte aus.

Berechnet man nun noch das Signifikanzniveau, welches auch als p-Wert bezeichnet wird, ergibt sich für diesen Datensatz ein p-Wert $< 2 \cdot 10^{-16}$. Dieser Wert gilt als hoch signifikant. Deshalb wird nun im weiteren Vorgehen dieser Datensatz unterschiedlichen Regressionsanalysen unterzogen.

3.2.6 Regressionsanalyse Siedlungen

Bei der Regressionsanalyse wird der gerichtete Zusammenhang zwischen der unabhängigen Variable X und der abhängigen Variable Y gemessen. In diesem Fall wirkt die Variable X auf die Variable Y , wie in Gleichung 21 dargestellt [92, S. 144].

$$Y = f(X) \quad (21)$$

Über die lineare Regression wird die Vorgehensweise beispielhaft dargestellt, mit der im weiteren das Streudiagramm aus der unabhängigen Variable X (Produkt aus Siedlungsfläche und Anzahl Gebäude) und der abhängigen Variable Y (Länge Wärmenetz) analysiert wird. In Abbildung 89 sind als rote Punktwolke Beobachtungswerte eingetragen. Die Verteilung deutet auf einen linearen Zusammenhang hin. Dieser Zusammenhang wird als blaue Gerade dargestellt. Auf dieser liegen in grün dargestellt die Regresswerte. Dies sind Schätzwerte, welche durch die Geradengleichung berechnet werden. Der Unterschied zwischen Beobachtungswert y_i und Regresswert \hat{y}_i wird, wie in Gleichung 22 dargestellt, als Residuum \hat{e}_i bezeichnet [92, S. 149].

$$\hat{e}_i = y_i - \hat{y}_i \quad (22)$$

Wird nun in die Gleichung 23 ein Wert x_i eingesetzt, erhält man den Regresswert \hat{y}_i [92, S. 149].

$$\hat{y}_i = b_0 \cdot x_i + b_1 \quad (23)$$

Hierzu ist es erforderlich, zuerst die Parameter b_0 und b_1 dieser Geradengleichung zu bestimmen. Dabei sollen die Residuen e_i möglichst klein ausfallen. Dies wird durch das Verfahren der kleinsten Quadrate erreicht [92, S. 149].

$$b_1 = \bar{y} - b_0 \cdot \bar{x} \quad (24)$$

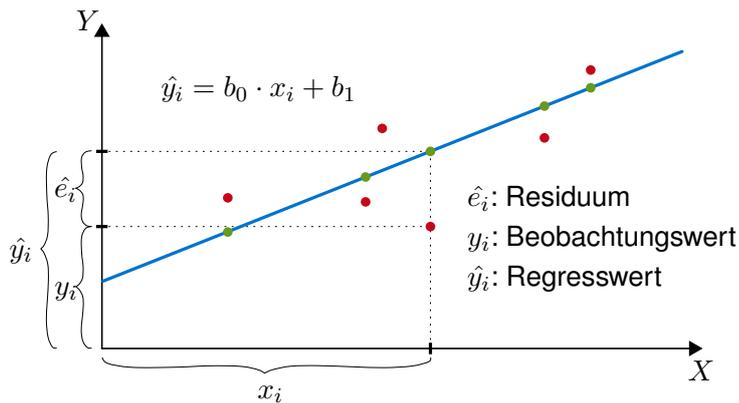


Abbildung 89 Lineare Regressionsfunktion

In Gleichung 24 wird der Achsenabschnitt b_1 der Regressionsgeraden berechnet. Dies geschieht über die arithmetischen Mittelwerte \bar{x} und \bar{y} , sowie die Steigung b_0 [92, S. 149].

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (25)$$

Die hierzu erforderliche Steigung b_0 der Geraden, wird mit der Gleichung 25 berechnet [92, S. 149].

Lineare Funktion

Die einfachste Art der Regression ist die lineare Regression nach Gleichung 26. Hierbei wird eine Geradengleichung gesucht, von der die einzelnen Punkte die geringste Abweichung aufweisen. Diese wird nun für den Datensatz aus Abschnitt 3.2 ermittelt.

$$y = b_0 \cdot x + b_1 \quad (26)$$

Wie schon optisch zu erkennen ist passt sich diese Gerade nur unzureichend an die Punktwolke des Streudiagramms in Abbildung 90 an. Die Standardabweichung σ beträgt 1.973. Das bedeutet, dass die einzelnen Werte im Mittel um 1.973 m von den berechneten Werten auf der Geraden abweichen.

Polynomfunktion

Eine weitere Möglichkeit der Regression ist die mittels einer Polynomfunktion. Fahrmeir, Knapp und Lang empfehlen bei einer polynominalen Regression maximal drei Polynomgrade [94, S. 75]. Für die in RStudio durchgeführte Regression wird deshalb eine Polynomfunk-

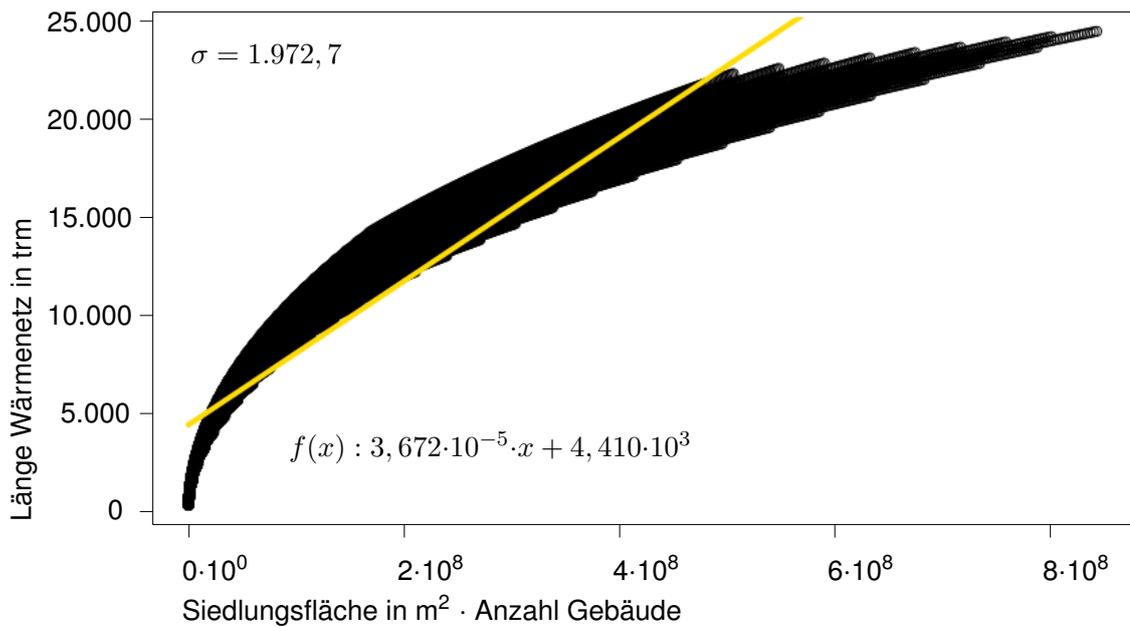


Abbildung 90 Regression Länge Wärmenetz mit linearer Funktion

tion dritten Grades nach Gleichung 27 verwendet. Wie in Abbildung 91 ersichtlich ist, passt sich diese Kurve sehr viel besser an die Punktwolke an, als die der linearen Funktion. Die Standardabweichung σ beträgt hier nur noch 805.

$$y = b_0 \cdot x^3 + b_1 \cdot x^2 + b_2 \cdot x + b_3 \quad (27)$$

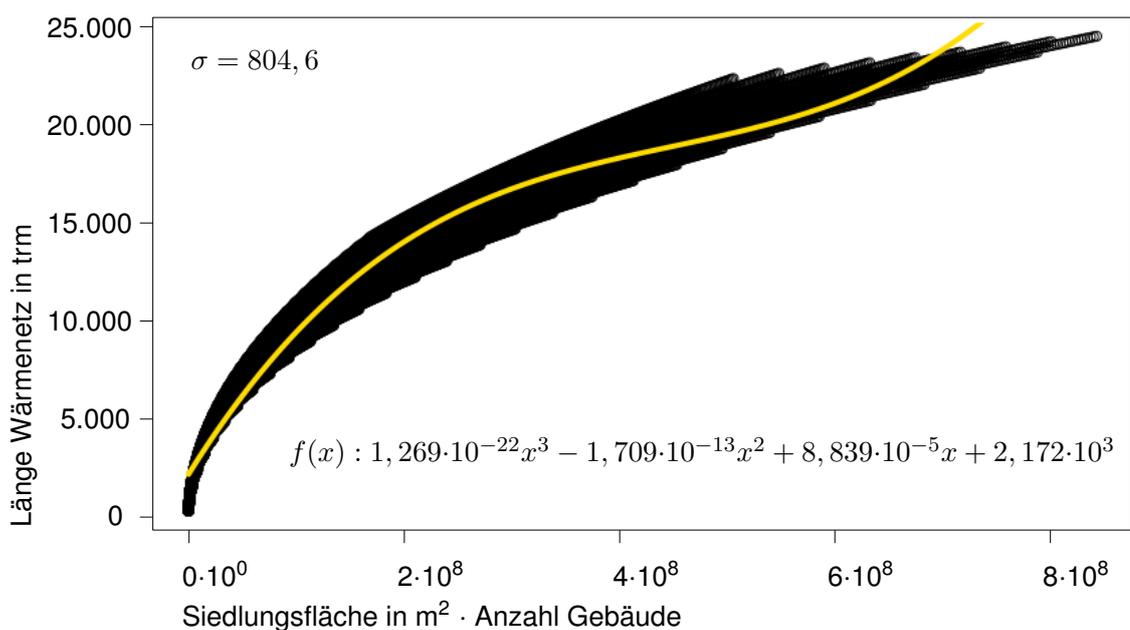


Abbildung 91 Regression Länge Wärmenetz mit Polynomfunktion

Wurzelfunktion

Als nächstes wird die Regression mit einer Wurzelfunktion durchgeführt. Hierzu wird in RStudio Gleichung 28 verwendet. Wie in Abbildung 92 zu sehen ist, passt sich diese Kurve sehr gut an die Punktwolke an. Die Standardabweichung σ reduziert sich auf 587.

$$y = b_0 \cdot x^{\frac{1}{b_1}} \quad (28)$$

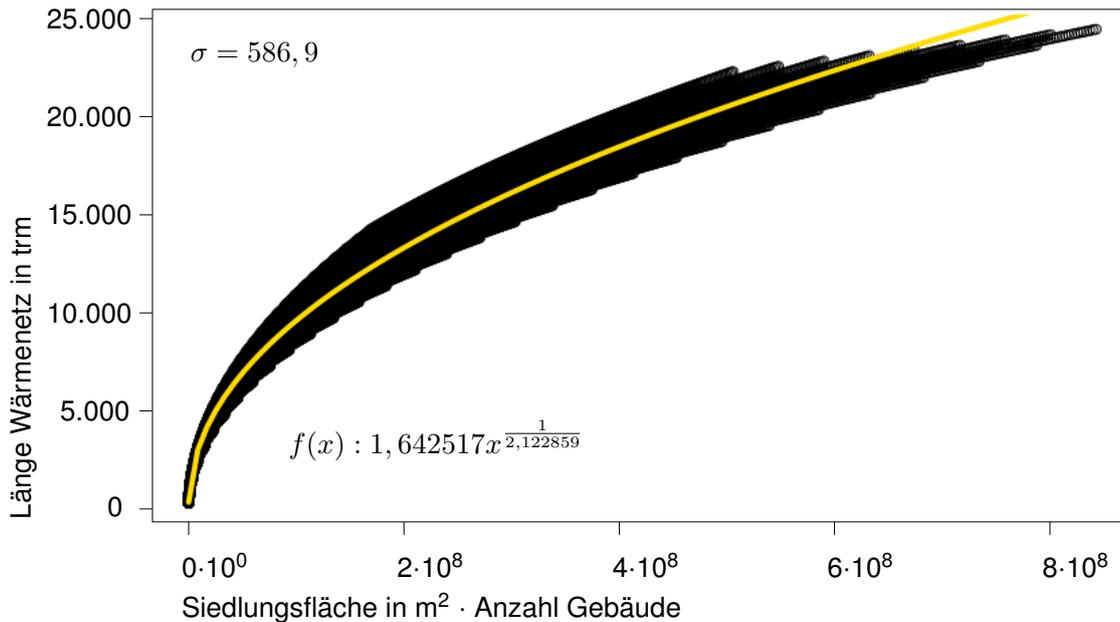


Abbildung 92 Regression Länge Wärmenetz mit Wurzelfunktion

Natürlicher Logarithmus

Ein weiterer Regressionsversuch mit der natürlichen Logarithmusfunktion (Gleichung 29) führt hier zum schlechtesten Ergebnis dieser Serie. Wie in Abbildung 93 zu sehen ist, startet der Verlauf der Kurve im Anfangsbereich zu steil und flacht anschließend zu stark ab. Diese Variante führt zu der höchsten Standardabweichung σ mit 2.364.

$$y = b_0 \cdot \ln(x) + b_1 \quad (29)$$

Kombinierte Funktion

Das beste Ergebnis erzielt eine kombinierte Funktion nach Gleichung 30 mit Anteilen aus natürlichem Logarithmus, Wurzel- und Linearfunktion. Hier beträgt die Standardabweichung σ lediglich 551. Man kann in Abbildung 94 gut erkennen, dass hier die Kurve im unteren Bereich sehr viel passgenauer verläuft als in Abbildung 92. Besonders der Knick bei etwa 3.000 t·m

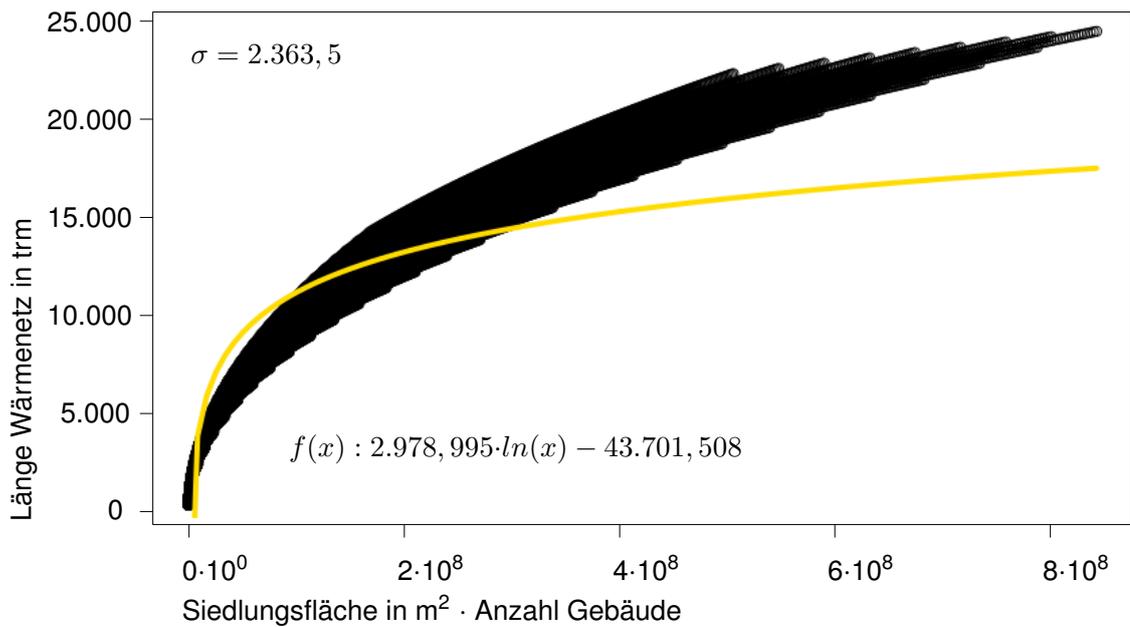


Abbildung 93 Regression Länge Wärmenetz mit natürlichem Logarithmus

in Abbildung 92 verläuft in der Darstellung der zusammengesetzten Funktion sehr viel runder und mittiger. Auch im Mittelteil passt sich die Kurve besser der Punktwolke an.

$$y = b_0 \cdot \ln(x + \sqrt{x^2 + 1}) + b_1 \cdot \sqrt{x} + b_2 \cdot x + b_3 \quad (30)$$

Diese Gleichung wird deshalb in der weiteren Arbeit für die folgenden Analysen verwendet.

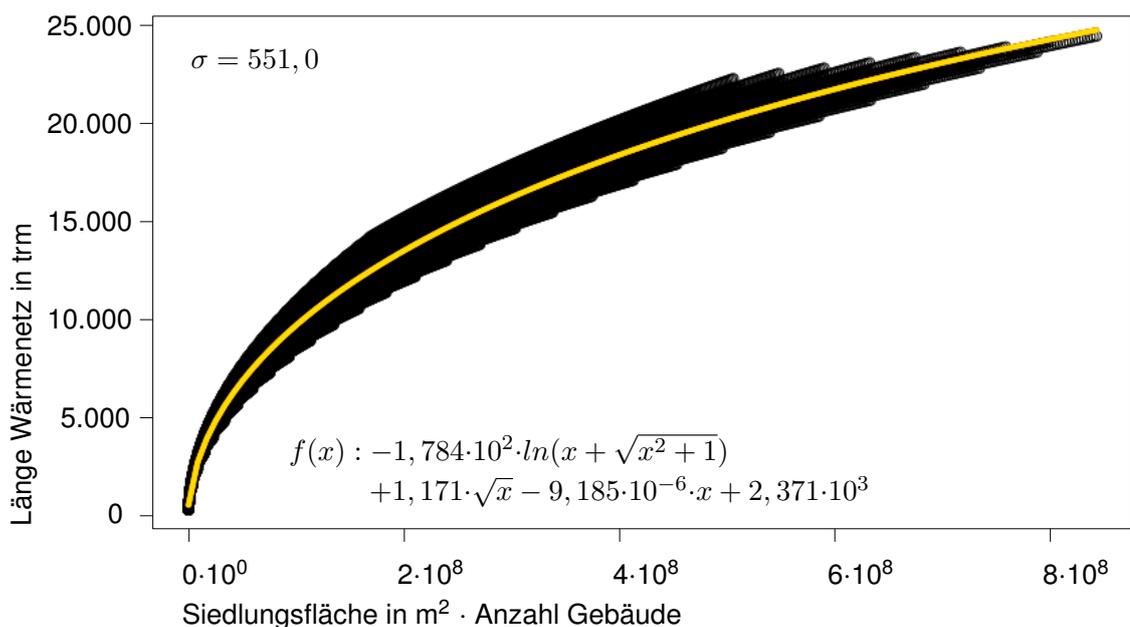


Abbildung 94 Regression Länge Wärmenetz mit zusammengesetzter Funktion

3.2.7 Validierung des Verfahrens zur Netzlängenberechnung

Bestimmung der Grenzen

Zur Bestimmung der Bandbreite möglicher Siedlungsdichten wird hier zuerst eine maximal dichte Einfamilienhaussiedlung konstruiert (siehe Abbildung 95). Als Vorlage dient hier die Siedlung von Everding [25, S. 162], basierend auf dem Mindestabstand der deutschen Musterbauordnung § 6 Abs. 5 Satz 3.

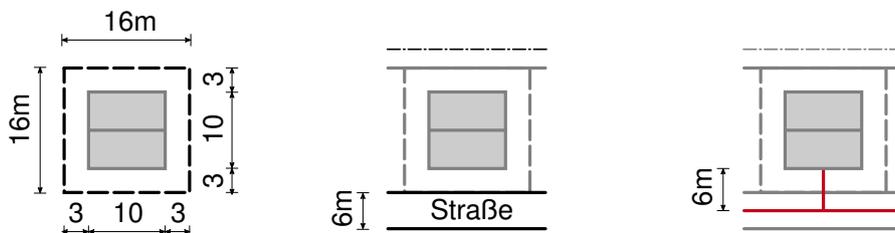


Abbildung 95 Grundstück mit sehr dichter Bebauung nach Everding (Quelle: In Anlehnung an [25, S. 162])

Hierbei wird die Siedlung von Everding auf das Muster der Standardvariante (Abbildung 83) übertragen. Um die Dichte noch zu steigern, wird ein horizontaler Verbindungsweg in jeder zweiten Reihe eliminiert. Hieraus entsteht das Muster in Abbildung 96.

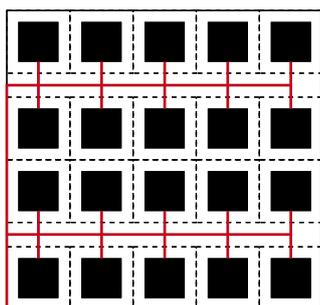


Abbildung 96 Synthetische Siedlung mit sehr dichter Bebauung (Quelle: In Anlehnung an [25, S. 162])

Aus den Kaufwerten für Bauland 2018 des Statistischen Bundesamtes [95, S. 38] geht hervor, dass etwa 7% der im Jahr 2018 verkauften Grundstücke 100 - 300 m² groß waren. Die Grundstücke der extrem dichten Einfamilienhaussiedlung liegen mit einer Fläche von 256 m² in dieser Kategorie. Am anderen Ende der Grundstücksgrößen liegen Grundstücke größer als 3.000 m² ebenfalls mit etwa 7% Verkaufsanteil. Deshalb wird für ein Siedlungsmodell mit einem ungünstigen Zuschnitt das 16 m x 16 m Grundstück der dichten Bebauung auf 200 m in die Breite gestreckt, so dass die Grundstücksfläche etwas über 3.000 m² liegt (Abbildung 97).

Mit diesem Grundstück wird, wie in Abbildung 95 dargestellt, ein Siedlungsmodell entwickelt. Dieses Modell enthält lange horizontale Trassenwege bei verhältnismäßig kurzen Hausanbindeleitungen (Abbildung 98).

Eine Gegenüberstellung der beiden Siedlungen zeigt Tabelle 17. Hierin stehen als Spaltenüberschrift die Variablen aus Abbildung 86. In der letzten Spalte ist die Gesamtlänge der

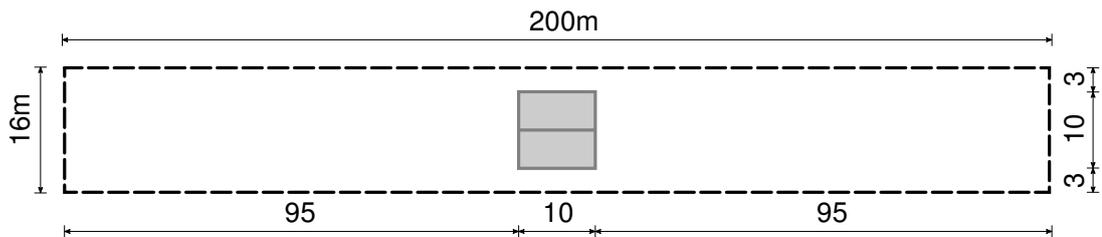


Abbildung 97 Grundstück mit extra großer Breite

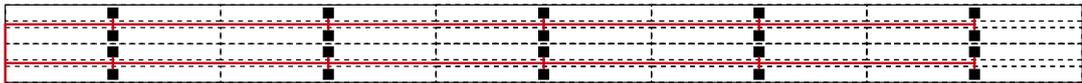


Abbildung 98 Synthetische Siedlung mit extra breiten Grundstücken

jeweiligen Trasse aufgeführt.

Tabelle 17 Berechnung Netzlänge extreme synthetische Siedlungen

Grundstück (BxH)	m	A0 [m ²]	LH0 [m]	LS0 [m]	LAI [m]	L _{ges} [m]
16m x 16m	20	6.080	72	54	6	318
200m x 16m	20	76.000	900	54	6	1.974

Werden nun die Längen mit der Regressionsformel aus Abbildung 94 berechnet, ergibt sich für das dichte Siedlungsmodell eine Netzlänge von 566 m und für das gestreckte Siedlungsmodell eine Netzlänge von 1138 m. Daraus folgt, dass durch die Regressionsformel im dichten Siedlungsmodell die Netzlänge um etwa 78 % zu hoch berechnet wird, wo hingegen im gestreckten Siedlungsmodell die Netzlänge um etwa 48 % zu niedrig berechnet wird.

Als Vergleich wird das dichte Siedlungsmodell gleichmäßig auf eine Grundstückskantenlänge von 57 m gestreckt. So ist die Grundstücksfläche (3.249 m²) mit der aus der gestreckten Variante vergleichbar. Die Gebäude liegen weiterhin in der Grundstücksmitte. In dieser Variante wird die Trassenlänge nur noch um 14 % zu niedrig berechnet.

Anwendung am Beispiel Osnabrück

Zur Validierung des Regressionsverfahrens bzw. zur Längenbestimmung des Wärmenetzes eines Quartiers, werden die Daten von Eikmeier et al. [39] verwendet. Diese haben in ihrem Bericht: „Ermittlung der Potenziale der Kraft-Wärme-Kopplung und der Erdwärme (Wärmepumpen) in Osnabrück“ auf Seite 34 eine Liste mit Clustern bzw. Quartieren der Stadt Osnabrück in Niedersachsen abgedruckt. In dieser Liste sind je Cluster sowohl die Länge des Verteilnetzes und der Hausanschlussleitungen als auch die Anzahl an Hausanschlüssen enthalten.

Als fehlende Größe zur Validierung bleibt die jeweilige Fläche der Cluster bzw. Quartiere.

Deren Ermittlung erfolgt mit Hilfe der Software QGIS. Hierzu wird aus dem Modul OpenLayers plugin die OpenStreetMap Karte geladen. Anschließend werden aus den Abbildungen auf den Seiten 36 und 38 des Berichts von Eikmeier et al. die Clustergrenzen ermittelt und in QGIS auf die OpenStreetMap Karte als Polygonlayer gezeichnet. Über den Feldrechner in QGIS kann der Flächeninhalt der geschlossenen Polygonumrandung der jeweiligen Cluster berechnet werden. Daraus entstehen die Karten in Anhang B. In den Karten ist die Fläche in m^2 eingetragen.

Nun kann mit der Formel aus der Regressionsanalyse in Abbildung 94 auf Basis der Clusterfläche die Gesamtlänge des Wärmenetzes berechnet werden. In den Tabellen 18 und 19 werden diese Werte in die Spalte „Netzlänge berechnet“ eingetragen. Die Spalte „Netzlänge original“ enthält die Werte aus der Studie von Eikmeier et al. [39]. Zur Validierung werden nur diejenigen Cluster verwendet, die eine Gesamtnetzlänge von unter 21.000 trm aufweisen, da hier die Punktwolke des Streudiagramms in Abbildung 94 im oberen Bereich endet.

Zusätzlich wird in der ersten Spalte die Quartier- bzw. Clusterbezeichnung aus der Studie übernommen. Die Reihenfolge entspricht hier der Reihenfolge aus der Studie. In der zweiten Spalte stehen die in QGIS ermittelten Flächen in m^2 . Die nächste Spalte listet die Anzahl an Hausanschlüssen auf. Das Ergebnis ist in der letzten Spalte aufgeführt. Hier werden die berechnete Netzlänge durch die Netzlänge aus der Studie geteilt und die Abweichung in Prozent aufgeführt. Positive Werte bedeuten, dass die berechneten Netzlängen höher sind als die Längen aus der Studie. Bei negativen Werten ist es umgekehrt.

Zur Auswertung wird aus den Abweichungswerten in RStudio ein Boxplotdiagramm (Abbildung 99) erstellt, das die Spannweite der Abweichungen aufzeigen soll. Hierin werden als Box auf der linken Seite das 25 %-Quantil und auf der rechten Seite das 75 %-Quantil dargestellt. Diese werden auch als unteres Quartil und oberes Quartil bezeichnet [92, S. 61]. In der Abbildung 99 ist zu erkennen, dass 50 % aller Werte innerhalb von -3,9 % und 12,9 % liegen. Der Median (50 %-Quantil) ist als senkrechter Strich innerhalb der Box eingetragen und liegt bei 3,3 %. Hieraus kann man eine leichte Verschiebung in den positiven Bereich ausmachen. Dies bedeutet, dass die berechneten Werte eher etwas zu hoch ausfallen. Diese Verschiebung wird auch an den beiden Whiskern deutlich. Der untere Whisker (0 %-Quantil) liegt bei -22,4 %, der obere Whisker (100 %-Quantil) bei 25,2 %. Diese beiden Werte markieren die gesamte Spannweite an Werten aus dieser Validierung. Das bedeutet die berechneten Netzlängen werden maximal um 22,4 % zu kurz und 25,2 % zu lang berechnet.

Die Validierung wurde anhand von 30 Clustern in Osnabrück durchgeführt. Wie in Anhang B zu sehen ist, weisen die Cluster sowohl unterschiedliche Größen als auch unterschiedliche Strukturen auf. Neben reinen Wohngebieten sind auch Gewerbe- und Industriestrukturen enthalten. Dies führt zu dem Resultat, dass die Ergebnisse der Validierung aussagekräftig sind.

Tabelle 18 Auswertung Projekte Osnabrück Teil 1 (Quelle: Daten aus [39, S. 37])

Cluster	Fläche	Anzahl	Netzlänge original	Netzlänge berechnet	Abweichung ber./orig.
Zum Himmelreich	221.804	132	5.242	5.248	0,1%
Rheiner Landstraße	388.578	33	3.179	3.403	7,1%
Portweg	149.914	99	3.906	3.676	-5,9%
Preußenweg	532.633	370	11.339	13.469	18,8%
Bramkamp	275.982	260	8.222	8.281	0,7%
Fürstenauer Weg	529.711	468	16.400	14.960	-8,8%
Pyer Kirchweg	211.417	193	7.007	6.226	-11,1%
Gretescher Weg	556.908	623	16.984	17.364	2,2%
Strothmannsweg	470.181	494	14.436	14.524	0,6%
Hauptmannstraße	187.013	134	5.351	4.840	-9,6%
Schledehauser Weg	252.311	221	6.696	7.297	9,0%
Sandforter Straße	115.260	36	1.499	1.876	25,2%
Kreuzhügel	128.250	28	2.243	1.741	-22,4%
Ansgarstraße	455.259	355	11.526	12.278	6,5%
Bahlweg	350.958	368	9.745	11.037	13,3%

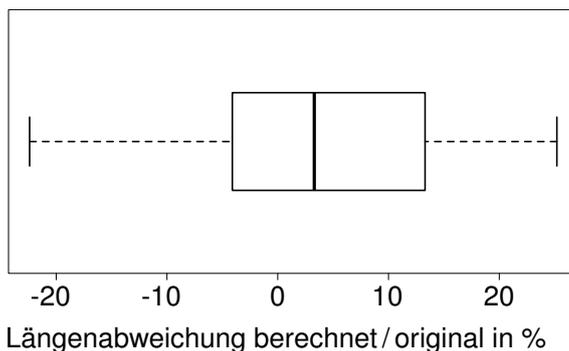


Abbildung 99 Netzlängenabweichungen aus Tabellen 18 und 19

3.2.8 Vergleich des Verfahrens mit einfachen Methoden

In diesem Kapitel wird das Verfahren zur Netzlängenberechnung mit der Regressionsformel aus Abbildung 94 mit einfachen Methoden zur Netzlängenbestimmung verglichen.

Tabelle 19 Auswertung Projekte Osnabrück Teil 2 (Quelle: Daten aus [39, S. 37])

Cluster	Fläche	Anzahl	Netzlänge original	Netzlänge berechnet	Abweichung ber./orig.
Auf der Heide	273.174	182	6.071	6.886	13,4%
Wersener Landstraße	259.040	255	6.852	7.946	14,3%
Hannoversche Straße	1.538.436	357	20.008	21.056	5,2%
Hasestraße	495.340	605	14.563	16.284	11,8%
Freiheitsweg	910.303	874	21.080	24.313	15,3%
Goethering	283.108	172	7.106	6.814	-4,1%
Süsterstraße	572.550	391	12.426	14.282	14,9%
Bohmter Straße	768.656	663	20.888	20.425	-2,2%
Atterstraße	207.652	156	4.781	5.529	10,6%
Bucholtzstraße	134.890	100	3.635	3.495	-3,3%
Piesberger Straße	128.988	144	3.962	4.138	4,4%
Klößnerstraße	586.746	59	4.866	5.722	17,6%
Pagenstecherstraße	358.081	106	5.892	6.000	1,8%
Elbestraße	1.012.651	85	10.323	9.061	-12,2%
Rheinstraße	142.605	37	2.225	2.127	-4,4%

Benchmark Fläche je Trassenmeter

Aus den synthetischen Siedlungsmodellen wird jeweils der Quotient aus Siedlungsfläche und Wärmenetzlänge gebildet. Für die so ermittelten 67.770 Werte wird das arithmetische Mittel berechnet. Mit diesem Benchmark werden anschließend die Längen der Wärmenetze in Osnabrück aus den Tabellen 18 und 19 berechnet. Der Mittelwert aller 67.770 Quotienten ergibt $43 \text{ m}^2/\text{trm}$.

Die Übersicht in Abbildung 100 zeigt, dass die Längenermittlung über die Regressionsformel deutlich besser funktioniert als über den Benchmarkwert $43 \text{ m}^2/\text{trm}$. Die Spannweite der Regressionsrechnung beträgt 47,6% und entspricht in etwa dem Interquartilsabstand bzw. interquartile range (IQR) der Benchmarkmethode mit 45,1%. Zudem gibt es bei der Berechnung mit der Regressionsformel keine Ausreißer.

Tabelle 20 Berechnung mit 43 m²/trm | Osnabrück Teil 1 (Quelle: Daten aus [39, S. 37])

Cluster	Fläche	Anzahl	Netzlänge original	Netzlänge berechnet	Abweichung ber./orig.
Zum Himmelreich	221.804	132	5.242	5.158	-1,6%
Rheiner Landstraße	388.578	33	3.179	9.037	184,3%
Portweg	149.914	99	3.906	3.486	-10,7%
Preußenweg	532.633	370	11.339	12.387	9,2%
Bramkamp	275.982	260	8.222	6.418	-21,9%
Fürstenauer Weg	529.711	468	16.400	12.319	-24,9%
Pyer Kirchweg	211.417	193	7.007	4.917	-29,8%
Gretescher Weg	556.908	623	16.984	12.951	-23,7%
Strothmannsweg	470.181	494	14.436	10.934	-24,3%
Hauptmannstraße	187.013	134	5.351	4.349	-18,7%
Schledehauser Weg	252.311	221	6.696	5.868	-12,4%
Sandforter Straße	115.260	36	1.499	2.680	78,8%
Kreuzhügel	128.250	28	2.243	2.983	33,0%
Ansgarstraße	455.259	355	11.526	10.587	-8,1%
Bahlweg	350.958	368	9.745	8.162	-16,2%

Benchmark Trassenmeter je Wohneinheit

Die nächste Methode basiert auf den Benchmarkwerten aus dem Leitfaden Nahwärme [36, S. 47]. Hier geben Dötsch et al. Kennwerte für die spezifische Netzlänge basierend auf Wohneinheiten (WE) an. In Tabelle 22 sind diese für die unterschiedlichen Gebäudearten aufgelistet.

Als Beispiel dienen wieder die Osnabrücker Cluster aus dem Abschlussbericht des Fraunhofer IFAM [39, S. 37]. Hierin sind auch für jedes Cluster die Gesamtwärmebedarfswerte für das Jahr 2012 angegeben. Zur Berechnung der Netzlängen werden zwei weitere Quellen verwendet. Zum einen dient der durchschnittliche Energieverbrauch der Haushalte im Bereich Wohnen für Raumwärme und Warmwasser im Jahr 2010 aus der Veröffentlichung „Umweltökonomische Gesamtrechnungen - Private Haushalte und Umwelt“ des statistischen Bundesamtes [96, S. 9] als Umrechnungsfaktor von Energie auf Wohneinheiten. Der Energieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser beträgt demnach im Jahr 2010 für einen Haushalt 15.128 kWh.

Tabelle 21 Berechnung mit 43 m²/trm | Osnabrück Teil 2 (Quelle: Daten aus [39, S. 37])

Cluster	Fläche	Anzahl	Netzlänge original	Netzlänge berechnet	Abweichung ber./orig.
Auf der Heide	273.174	182	6.071	6.353	4,6%
Wersener Landstraße	259.040	255	6.852	6.024	-12,1%
Hannoversche Straße	1.538.436	357	20.008	35.778	78,8%
Hasestraße	495.340	605	14.563	11.520	-20,9%
Freiheitsweg	910.303	874	21.080	21.170	0,4%
Goethering	283.108	172	7.106	6.584	-7,3%
Süsterstraße	572.550	391	12.426	13.315	7,2%
Bohmter Straße	768.656	663	20.888	17.876	-14,4%
Atterstraße	207.652	156	4.781	4.829	1,0%
Bucholtzstraße	134.890	100	3.635	3.137	-13,7%
Piesberger Straße	128.988	144	3.962	3.000	-24,3%
Klößnerstraße	586.746	59	4.866	13.645	180,4%
Pagenstecherstraße	358.081	106	5.892	8.327	41,3%
Elbestraße	1.012.651	85	10.323	23.550	128,1%
Rheinstraße	142.605	37	2.225	3.316	49,1%

Tabelle 22 Netzwärmeverlust und spezifische Netzlänge (Quelle: In Anlehnung an [36, S. 47])

Wärmeverlust	bei Spitzenlast	Jahresmittel	spez. Netzlänge
Einfamilienhausbebauung	4-5%	12-17%	(14-25 m/WE)
Reihenhausbebauung	3-4%	8-12%	(6-14 m/WE)
Mehrfamilienhausbebauung	2-3%	5-9%	(2-6 m/WE)
AGFW-Statistik über 843 Netze		11%	

Als zweite Quelle dient das Geodatenportal Osnabrück [97]. Anhand der Luftbilder kann hiermit eine Einordnung der Cluster in die Kategorie der Bebauung nach Tabelle 22 erfolgen. Bei Gewerbegebieten wird der Wert für Mehrfamilienhausbebauung gewählt, bei Mischformen der Wert dazwischen.

Die Übersicht in Abbildung 100 zeigt, dass auch hier die Längenermittlung über die Regres-

Tabelle 23 Berechnung mit trm/WE | Osnabrück Teil 1 (Quelle: Daten aus [39, S. 37])

Cluster	GWB 2012	WE	spez. trm	Netzlänge original	Netzlänge berechnet	Abweichung ber./orig.
Zum Himmelreich	4.717	312	19	5.242	5.924	13,0%
Rheiner Landstraße	3.179	662	4	3.179	2.648	-16,7%
Portweg	4.447	294	19	3.906	5.585	43,0%
Preußenweg	16.999	1.124	10	11.339	11.237	-0,9%
Bramkamp	9.341	617	10	8.222	6.175	-24,9%
Fürstenauer Weg	15.628	1.033	19	16.400	19.628	19,7%
Pyer Kirchweg	6.257	414	19	7.007	7.858	12,2%
Gretescher Weg	22.644	1.497	10	16.984	14.968	-11,9%
Strothmannsweg	12.986	858	19	14.436	16.310	13,0%
Hauptmannstraße	4.254	281	19	5.351	5.343	-0,2%
Schledehauser Weg	7.410	490	19	6.696	9.307	39,0%
Sandforter Straße	4.941	327	4	1.499	1.306	-12,8%
Kreuzhügel	3.059	202	10	2.243	2.022	-9,8%
Ansgarstraße	19.477	1.287	10	11.526	12.875	11,7%
Bahlweg	11.981	792	10	9.745	7.920	-18,7%

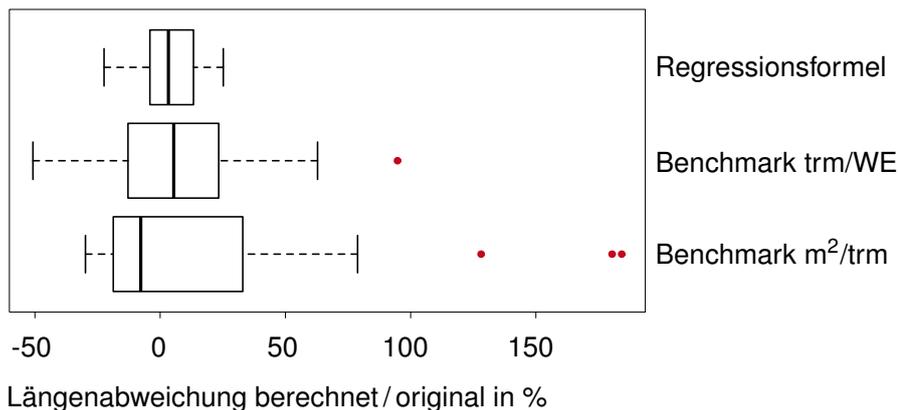


Abbildung 100 Vergleich der drei Verfahren zur Netzlängenberechnung

sionsformel deutlich besser funktioniert als über die, auf Wohneinheiten bezogenen, Benchmarkwerte. Das untere Quartil dieser Benchmarkmethode beträgt -12,6 %, das obere liegt bei 22,8 %. Daraus errechnet sich der IQR zu 35,4 % und ist nur etwas kleiner als die gesamte Spannweite aus der Regressionsformel.

Tabelle 24 Berechnung mit trm/WE | Osnabrück Teil 2 (Quelle: Daten aus [39, S. 37])

Cluster	GWB 2012	WE	spez. trm	Netzlänge original	Netzlänge berechnet	Abweichung ber./orig.
Auf der Heide	17.886	1.182	10	6.071	11.823	94,7%
Wersener Landstraße	7.922	524	10	6.852	5.237	-23,6%
Hannoversche Straße	72.516	4.793	4	20.008	19.174	-4,2%
Hasestraße	79.077	5.227	4	14.563	20.909	43,6%
Freiheitsweg	29.471	1.948	10	21.080	19.481	-7,6%
Goethering	43.582	2.881	4	7.106	11.524	62,2%
Süsterstraße	76.525	5.059	4	12.426	20.234	62,8%
Bohmter Straße	57.992	3.833	4	20.888	15.334	-26,6%
Atterstraße	8.923	590	10	4.781	5.898	23,4%
Bucholtzstraße	3.501	231	19	3.635	4.397	21,0%
Piesberger Straße	3.501	231	19	3.962	4.397	11,0%
Klößnerstraße	24.324	1.608	4	4.866	6.432	32,2%
Pagenstecherstraße	19.801	1.309	4	5.892	5.236	-11,1%
Elbestraße	19.212	1.270	4	10.323	5.080	-50,8%
Rheinstraße	5.713	378	4	2.225	1.511	-32,1%

3.3 Modellbildung synthetische Wärmenetze

Der zweite Schritt des Algorithmus in Abbildung 80 dient zur Ermittlung der relativen Wärmeverluste. Hierzu wird eine weitere Regressionsanalyse zur Bestimmung der Schätzformel durchgeführt. Die unabhängige Variable wird gebildet aus der Summe des flächenbezogenen und des längenbezogenen Siedlungswärmebedarfs. Für letzteres wird später die Länge des Wärmenetzes mit der ersten Regressionsformel berechnet.

Für Regressionsanalyse werden die Wärmeverluste mittels Simulationsberechnungen über rWärme berechnet. Dazu wird in einem ersten Schritt ein Wärmenetzmodell auf Basis des Siedlungsmodells aus Abbildung 83 erzeugt. Über das Variieren einzelner Parameter ergeben sich daraus 108 unterschiedliche Simulationsmodelle.

3.3.1 Wärmenetzmodell

Für das Basismodell werden die einzelnen Grundstücke aus Abbildung 82, inklusive ihrer halben Straßenanteile, regelmäßig aneinandergedügt (5 horizontal, 4 vertikal). Die so entstandene Basisvariante (Abbildung 83) hat eine Siedlungsfläche von 15.600 m² bei 20 Gebäuden.

3.3.2 Variationen

Für die Regressionsanalyse ist es erforderlich dieses Basismodell zu variieren, um eine Vielzahl an Datenpunkten zu generieren. Hierzu bedient man sich einer ganzzahligen Auswahl an Variationen unter Abschnitt 3.2.4, um die Anzahl der Simulationsvarianten nicht zu groß werden zu lassen.

Die erste Variation betrifft die Gebäudeanzahl n. Diese wird, wie in Abbildung 101 dargestellt, in den drei Varianten n = 12 Gebäude, n = 16 Gebäude und n = 20 Gebäude unterschieden.

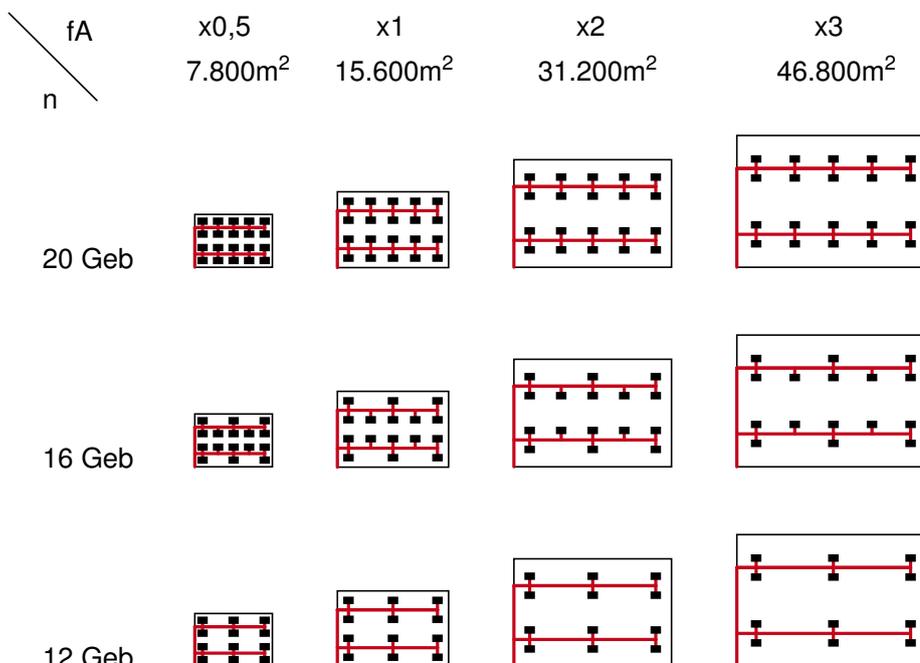


Abbildung 101 Wärmenetzmodell Faktoren fA und n=[12,16,20]

Mit dem zweiten Parameter fA in Abbildung 101 wird die Siedlungsfläche variiert. Dies erfolgt in vier Stufen. Zuerst wird die Fläche der Basisvariante mit fA = 0,5 halbiert. Dann folgen eine Verdoppelung mit fA = 2 und eine Verdreifachung mit fA = 3.

Die so erzeugten Varianten des Basismodells werden nun mit dem Faktor x vervielfältigt. Dies erfolgt in zwei zusätzlichen Stufen. Neben der Grundvariante x = 1 werden mit x = 16 die Siedlungen regelmäßig aneinandergedügt (vier horizontal, vier vertikal). Die große Variante beinhaltet mit x = 30 fünf horizontal und sechs vertikal aneinandergedügte Einzelsiedlungen. Die einzelnen Wärmenetze werden vertikal durchgehend verbunden. Horizontal werden zwei vertikale Siedlungsstreifen nur an der in Abbildung 102 eingezeichneten Stelle verbunden.

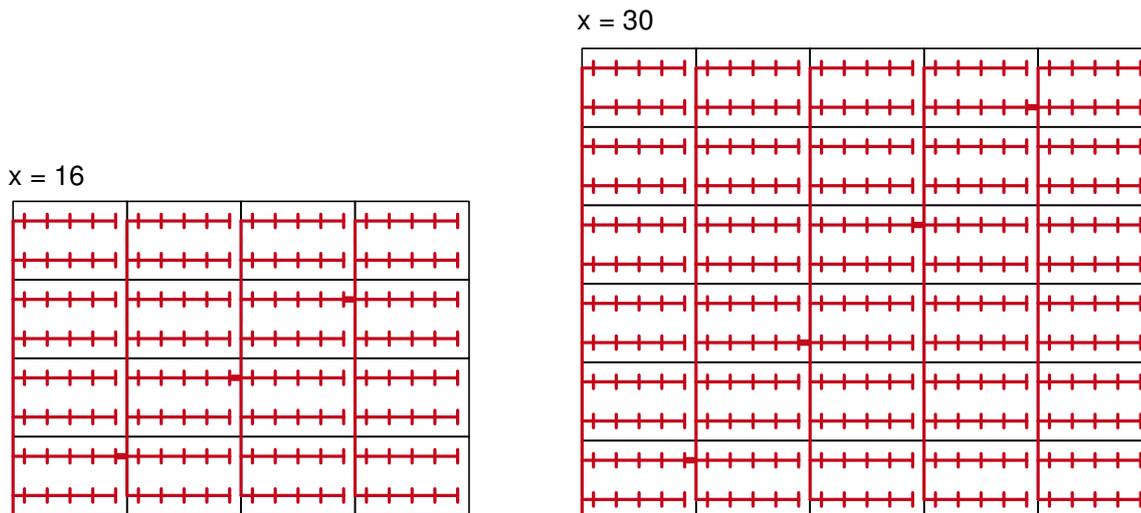


Abbildung 102 Wärmenetzmodell Faktor x

3.3.3 Simulation Wärmenetze

Die Simulation der dargestellten Wärmenetzvarianten erfolgt mit dem Programm rfWärme aus Kapitel 2. Hierzu werden die in CAD gezeichneten Wärmenetze in die Software QGIS importiert. Ebenso wird mit der CAD Datei der Abnehmerpunkte und der Datei mit dem Einspeisepunkt verfahren. In QGIS werden die einzelnen Layer als Shapedateien gespeichert.

Randbedingung Wärmeabnahme

Noch im QGIS werden den Abnehmerpunkten die entsprechenden Jahreswärmebedarfswerte hinzugefügt. Zur Ermittlung dieser, werden in drei Varianten Wärmebedarfsdichten gleichmäßig auf die Gebäudepunkte aufgeteilt. Es werden Wärmebedarfsdichten mit 150, 525 und 900 $\frac{\text{MWh}}{\text{ha}\cdot\text{a}}$ verwendet. Die Werte entstammen dem Leitfaden Energienutzungsplan [3, S. 19]. Darin sind die Werte 150 $\frac{\text{MWh}}{\text{ha}\cdot\text{a}}$ als untere Grenze und 900 $\frac{\text{MWh}}{\text{ha}\cdot\text{a}}$ als obere Grenze für die Darstellung der Wärmebedarfsdichte in Karten aufgeführt. Der Wert 525 $\frac{\text{MWh}}{\text{ha}\cdot\text{a}}$ ist der Mittelwert aus beiden. Diese Vorgehensweise berücksichtigt, dass bei zunehmendem Abstand zwischen den einzelnen Gebäuden diese in der Regel auch größer errichtet werden, um den zur Verfügung stehenden Baugrund auszunutzen. Die zunehmende Gebäudegröße geht auch einher mit einem zunehmenden absoluten Wärmebedarf der einzelnen Gebäude.

Aus den geometrischen Varianten ergeben sich in Kombination mit den Wärmebedarfsdichten insgesamt 108 Simulationsrechnungen.

Randbedingungen Rohrmaterial und Temperaturen

In der Studie: „Analyse und Optimierung von Fernwärmenetzen“ [98] untersuchen Thalmann et al. 52 Fernwärmenetze unterschiedlicher Größe in der Schweiz. Für jedes dieser Netze gibt es im Anhang der Studie ein Datenblatt, in dem unter anderem die Werte zu Rohrmaterial,

Dämmstärke und Temperaturen aufgeführt werden. Um diese Daten hier zu verwenden, werden die Projekte in drei Größenkategorien eingeteilt. Die kleinen Netze bewegen sich bis zu 10.000 MWh/a (Tabelle 25), die mittleren von 10.000 bis 100.000 MWh/a (Tabelle 26) und über 100.000 MWh/a (Tabelle 27) die großen Netze.

Für jede dieser Kategorien wird aus den Projektdaten ein typisches Rohrmaterial inklusive Dämmstärke ermittelt und der arithmetische Mittelwert der Vor-, Rücktemperatur, sowie der Temperaturdifferenz gebildet. Die zuvor erstellten, synthetischen Wärmenetze werden ebenso in diese drei Kategorien eingeteilt und mit den entsprechenden Rohrmaterialien und Temperaturwerten versehen.

Randbedingung Klimadaten

Für die Simulationen der einzelnen Wärmenetze wird das Referenzklima Deutschland als das Klima der Region Potsdam, wie unter Abschnitt 2.1.4 beschrieben, verwendet.

Randbedingung Dimensionierung

Das Dimensionieren erfolgt mit den Randbedingungen aus Abschnitt 2.2.2. Hierzu zählen der maximale Druckverlust von 150 Pa/m, sowie ein Anschlussgrad von 100 %. Die Temperaturdifferenzen für die Dimensionierung werden den Tabellen in Abschnitt 3.3.3 entnommen. Als minimale Vorlauftemperatur am Gebäude wird bei den kleinen Netzen 65 °C, bei den anderen 75 °C gewählt.

Randbedingung sonstige

Zur Sicherstellung der minimalen Vorlauftemperatur an jedem Gebäude, wird die Toleranz auf ± 1 K eingestellt. Um den Simulationsaufwand in Grenzen zu halten, wird als Abbruchbedingungen der Iteration (vgl. Abschnitt 2.2.3) die maximale Anzahl an Iterationsschritten auf 20 begrenzt.

3.3.4 Definition Wärmenetzverluste

Für die Darstellung der spezifischen Netzverluste (q_V) gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten. Wie in Gleichung 31 dargestellt, werden in der ersten die absoluten Wärmeverluste (Q_V) durch die an die Verbraucher abgegebene Wärmemenge (Q_{ab}) geteilt.

$$q_V = \frac{Q_V}{Q_{ab}} \quad (31)$$

In der Wissenschaft und Praxis werden, wie in Gleichung 32 dargestellt, die Wärmeverluste (Q_V) auf die durchgeleitete Wärmemenge (Q_{zu}) bezogen. Diese Vorgehensweise führt zu

Tabelle 25 Materialien und Temperaturen in Wärmenetzen < 10.000 MWh/a (Quelle: Daten aus [98])

Anlage Nr.	Material	ϑ_{VL} °C	ϑ_{RL} °C	$\Delta\vartheta$ K	Q_{ab} MWh/a
13	KMR 2	87,7	50,5	37,2	7.957
15	KMR 2	80,0	50,0	30,0	4.809
17	KMR 2	80,0	55,0	25,0	6.640
19	MMR 1	66,5	50,0	16,5	4.224
20	KMR 3	70,0	48,0	22,0	1.987
30	KMR 2	73,3	50,0	23,3	5.497
31	PMR 1	61,7	40,0	21,7	935
32	PMR 1	61,7	40,0	21,7	1.046
33	MMR 1	59,7	43,5	16,2	2.175
37	KMR 1	80,0	50,0	30,0	2.141
39	KMR 3	80,0	50,0	30,0	6.146
40	KMR 2	73,3	55,0	18,3	2.072
41	KMR 2	76,7	55,0	21,7	4.935
42	KMR 2	76,7	55,0	21,7	3.499
43	KMR 2	76,7	55,0	21,7	5.891
44	KMR 2	76,7	55,0	21,7	3.310
45	KMR 2	75,0	55,0	20,0	3.777
46	KMR 2	80,0	55,0	25,0	3.801
48	KMR 2	80,0	55,0	25,0	3.668
∅	KMR 2	74,5	50,9	23,6	3.922

deutlich niedrigeren Werten.

$$q_V = \frac{Q_V}{Q_{zu}} = \frac{Q_V}{Q_{ab} + Q_V} \quad (32)$$

Beispiele für diese Vorgehensweise finden sich im Band 2 der AGFW-Hauptstudie Pluralistische Wärmeversorgung [78, S. 177], in der Berechnung zu den Jahresberichten 2011-2015

Tabelle 26 Materialien und Temperaturen in Wärmenetzen 10.000 - 100.000 MWh/a (Quelle: Daten aus [98])

Anlage Nr.	Material	ϑ_{VL} °C	ϑ_{RL} °C	$\Delta\vartheta$ K	Q_{ab} MWh/a
1	KMR 3	80,0	60,0	20,0	25.000
3	KMR 2	91,7	55,0	36,7	42.333
7	KMR 2	96,7	55,0	41,7	65.650
9	KMR 2	87,3	60,0	27,3	45.410
10	KMR 3	80,0	52,0	28,0	10.492
14	KMR 2	87,7	50,5	37,2	74.777
18	KMR 1-2	90,0	55,0	35,0	10.700
∅	KMR 2	87,6	55,4	32,2	39.195

Tabelle 27 Materialien und Temperaturen in Wärmenetzen > 100.000 MWh/a (Quelle: Daten aus [98])

Anlage Nr.	Material	ϑ_{VL} °C	ϑ_{RL} °C	$\Delta\vartheta$ K	Q_{ab} MWh/a
2	KMR 3	81,7	57,5	24,2	710.000
12	Stahl 1	153,3	55,0	98,3	930.000
∅	KMR 1	117,5	56,3	61,2	820.000

von Hiendlmeier (C.A.R.M.E.N. e.V.) [6][7][8][9][10], in der Fernwärmestudie von Wolff und Jagnow [99, S. 21] und in der Studie: „Analyse und Optimierung von Fernwärmenetzen“ von Thalmann et al. [98].

Zur einfachen Handhabung werden in der weiteren Vorgehensweise die Wärmeverluste auf die abgenommene Wärmemenge nach Gleichung 31 bezogen. Um eine Vergleichbarkeit mit den Literaturwerten zu erhalten, lässt sich der spezifische Wärmeverlust später noch zu einem Wert nach Gleichung 32 umrechnen. Als Maßeinheit für Q_{ab} wird $\frac{MWh}{a}$ festgelegt. Die Maßeinheit der Netzlänge L ist trm, für die Quartierfläche A wird m^2 verwendet.

3.3.5 Korrelationsanalyse Wärmenetze

Aus den Ergebnissen der Simulationsvarianten wird nun in Abbildung 103 ein Streudiagramm erzeugt, welches auf der Ordinatenachse die Netzverluste und auf der Abszissenachse den spezifischen Wärmebedarf enthält. Der spezifische Wärmebedarf bildet sich aus dem Produkt des flächenbezogenen und des längenbezogenen Wärmebedarfs. In diesem Diagramm ist gut zu erkennen, dass es sich nicht um einen linearen Zusammenhang der beiden Größen

handelt, jedoch die Werte trotzdem eine klar erkennbare Korrelation aufweisen.

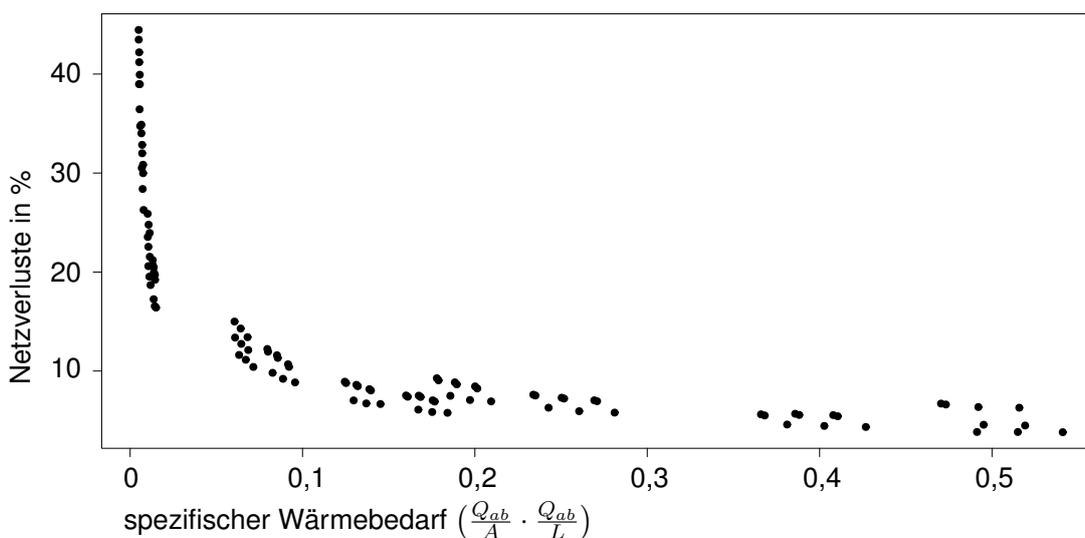


Abbildung 103 Streudiagramm aus spezifischen Netzverlusten

Um diese näher zu bestimmen, werden wie in Abbildung 104 dargestellt, die Ränge abgebildet und der Korrelationskoeffizient nach Spearman berechnet. Dieser ergibt den Wert $r_s = -0,9619284$. Das negative Vorzeichen passt zu Abbildung 104, da hier die Wertepaare einen fallenden Verlauf aufweisen. Insgesamt zeigt dieser Wert eine hohe negative Korrelation. Das Signifikanzniveau mit einem p-Wert von $< 2 \cdot 10^{-16}$ wird als hoch signifikant angesehen. Das Ergebnis dieser Analyse ergibt einen starken Zusammenhang der beiden Größen.

Somit eignet sich dieser Datensatz im nächsten Punkt als Basis einer Regressionsanalyse, mit der eine Regressionsformel ermittelt wird, die den Zusammenhang von unabhängiger und abhängiger Variable beschreibt.

3.3.6 Regressionsanalyse Wärmenetze

Als unabhängige Variable wird das Produkt der spezifischen Wärmebedarfswerte definiert. Davon abhängig ist die Höhe der Netzverluste. Diese Richtung ist offensichtlich, da sich Netzverluste physikalisch aus der Höhe der Abwärme des Trassennetzes im Verhältnis zur Abnahmemenge bzw. der Durchleitungsmenge berechnen lassen.

Lineare Funktion

Auch hier wird mit der linearen Regression begonnen. Es wird die Geradengleichung gesucht, bei der die einzelnen Punkte die geringste Abweichung zur Funktionsgeraden aufweisen. Diese wird nun aus dem Datensatz in Abbildung 103 ermittelt. Hierzu wird in RStudio mit Gleichung 26 eine Regression durchgeführt.

Das Ergebnis dieser Regression ist in Abbildung 105 dargestellt. Hier ist ersichtlich, dass diese Gerade nur unzureichend die Punktwolke des Streudiagramms beschreibt. Die Stan-

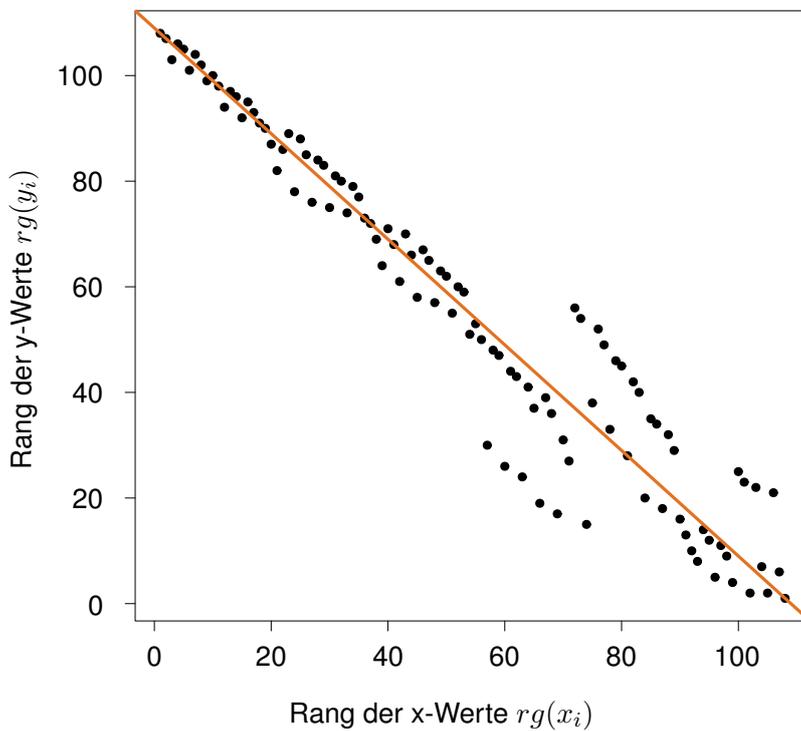


Abbildung 104 Streudiagramm aus Rängen $rg(x_i)$ und $rg(y_i)$

Standardabweichung σ beträgt 0,07932. Das bedeutet, dass die einzelnen Werte im Mittel um 7,932% von den berechneten Werten auf der Geraden abweichen.

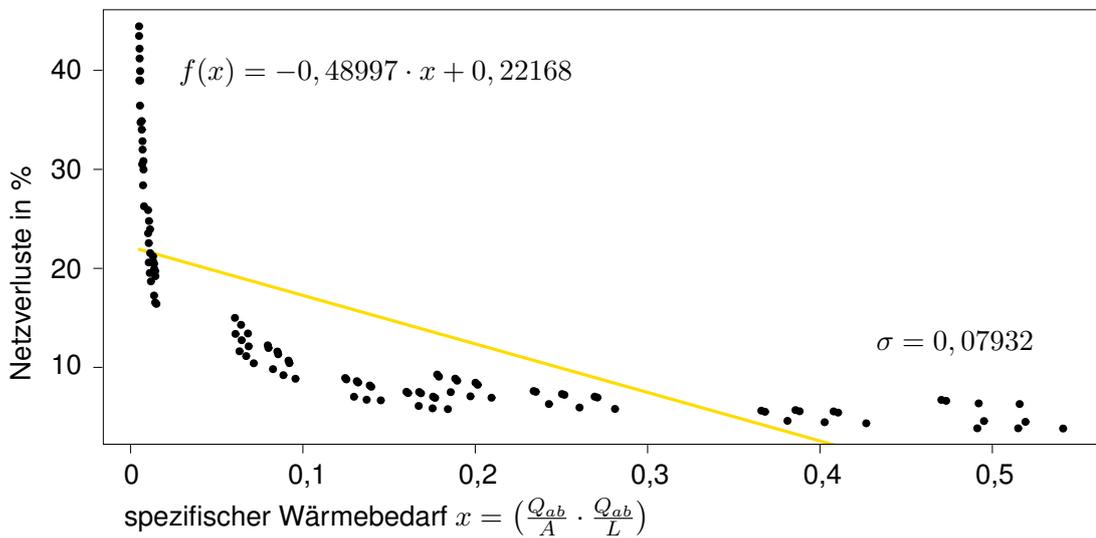


Abbildung 105 Regression Netzverluste mit linearer Funktion

Polynomfunktion

Im zweiten Schritt erfolgt die Regression in RStudio mittels Polynomfunktion dritten Grades nach Gleichung 27. Wie in Abbildung 106 ersichtlich, passt sich diese Kurve sehr viel besser an die Punktwolke an, als die der linearen Funktionsgleichung. Die Standardabweichung σ beträgt hier nur mehr 0,0416. Jedoch folgt die Kurve im Bereich unter ca. 0,02 nicht dem

steilen Anstieg der Punktwolke. Zwischen 0,2 und 0,3 liegt sie zu tief und von 0,35 bis 0,45 zu hoch.

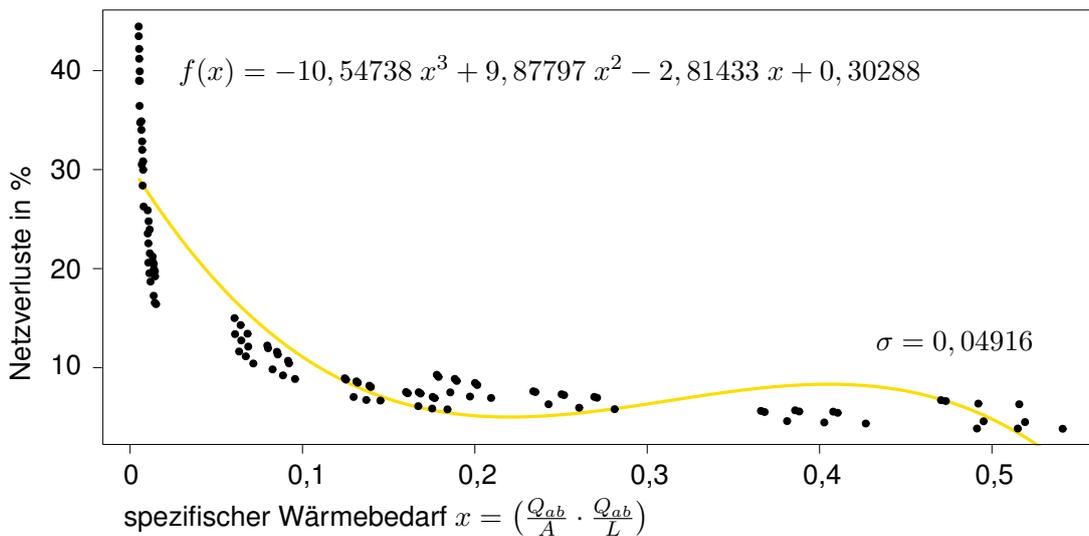


Abbildung 106 Regression Netzverluste mit Polynomfunktion

Natürlicher Logarithmus

Die natürliche Logarithmusfunktion hat mit negativem Vorzeichen einen ähnlichen Kurvenverlauf, wie die Punktwolke in Abbildung 103. Deshalb wird in RStudio eine Regression mit Gleichung 29 durchgeführt. Im Ergebnis (Abbildung 107) ist ersichtlich, dass auch hier der starke Anstieg im Bereich unter 0,02 nur unzureichend abgebildet wird. Im weiteren Verlauf liegt die Kurve zuerst über, anschließend unter den Werten. Weil aber die Kurve gleichmäßiger verläuft als in der polynomen Regression, ist hier die Standardabweichung σ knapp 1% niedriger.

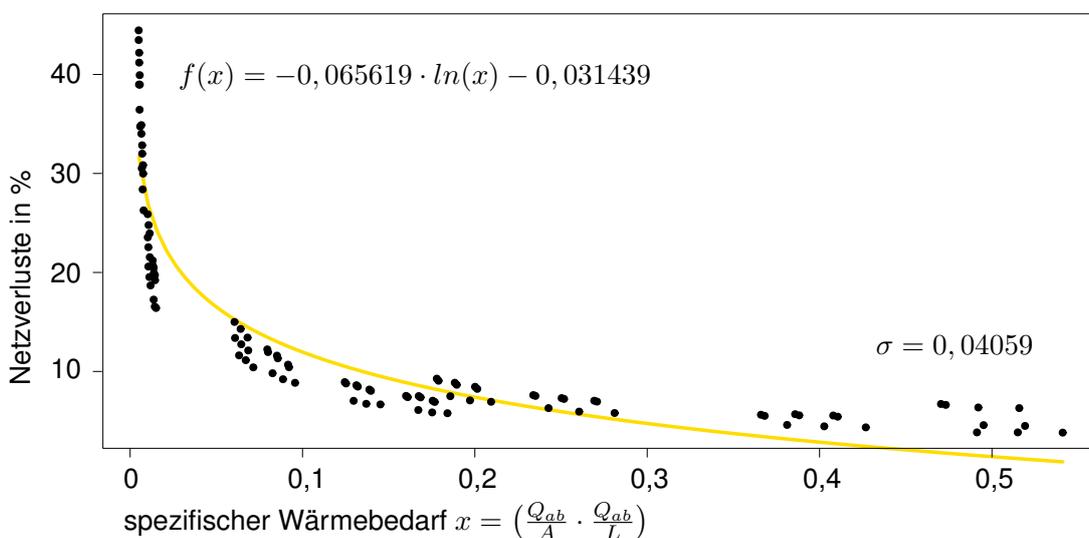


Abbildung 107 Regression Netzverluste mit natürlichem Logarithmus

Kotangens hyperbolicus Funktion

Der Verlauf der Kotangens hyperbolicus Funktion in Gleichung 33 nach Bartsch [100, S. 367] zeigt in der Darstellung von Grosche [101, S. 85] eine deutliche Übereinstimmung mit der Punktwolke.

$$\coth x = \frac{(e^x + e^{-x})}{(e^x - e^{-x})} = \frac{(e^{2x} + 1)}{(e^{2x} - 1)} = 1 + \frac{2}{(e^{2x} - 1)} \quad (33)$$

Für die Regression in RStudio wird die Gleichung 33 mit Parametern versehen. Dies führt zu Gleichung 34.

$$\coth x = b_0 \cdot \frac{1}{(e^{2x} - 1)} + b_1 \quad (34)$$

Die anschließende Regression zeigt eine sehr viel bessere Korrelation durch eine Standardabweichung σ von 0,01880 als die drei Regressionen zuvor. Somit weichen die einzelnen Werte im Mittel um 1,88% von den Werten der Funktionskurve ab. Wie jedoch in Abbildung 108 zu erkennen ist, liegt die Kurve im Bereich $x = 0,04 - 0,1$ deutlich zu tief.

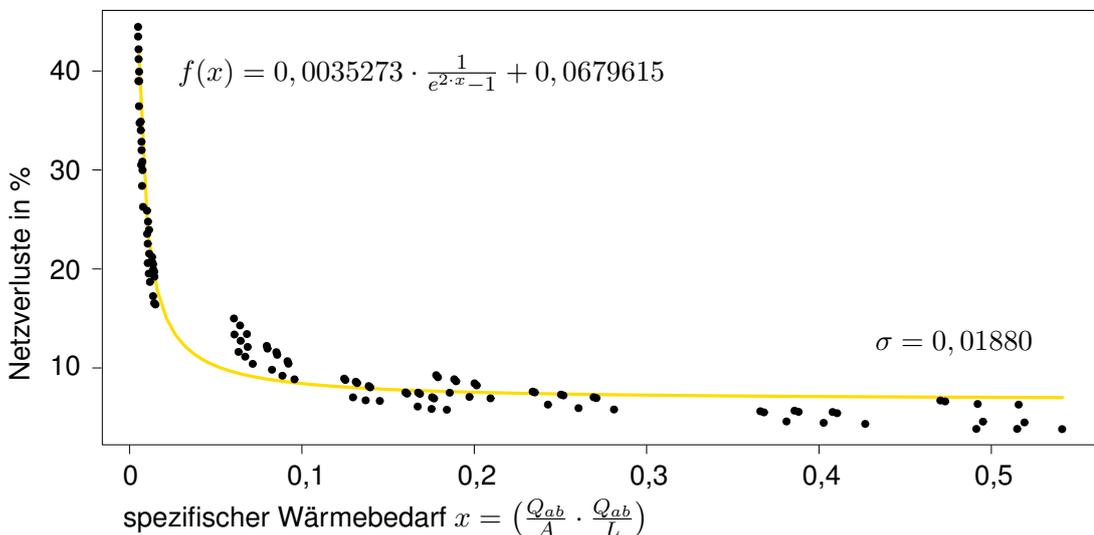


Abbildung 108 Regression Netzverluste mit Kotangens hyperbolicus

Kombinierte Funktion

Um die Vorteile der vorangegangenen Regressionen zu vereinen, wird nun in Gleichung 35 eine Regressionsformel erzeugt, welche sich aus der Summe von Polynomfunktion, Kotan-

gens hyperbolicus Funktion und dem natürlichen Logarithmus ergibt.

$$y = b_0 \cdot x^3 + b_1 \cdot x^2 + b_2 \cdot x + b_3 \cdot \frac{1}{(e^{2x} - 1)} + b_4 \cdot \ln x + b_5 \quad (35)$$

Das Ergebnis in Abbildung 109 zeigt eine Kurve, die sich optimal an die zugrunde liegende Punktwolke anpasst. Dies spiegelt sich auch in der Standardabweichung σ wider, welche nun bei 0,01344 liegt.

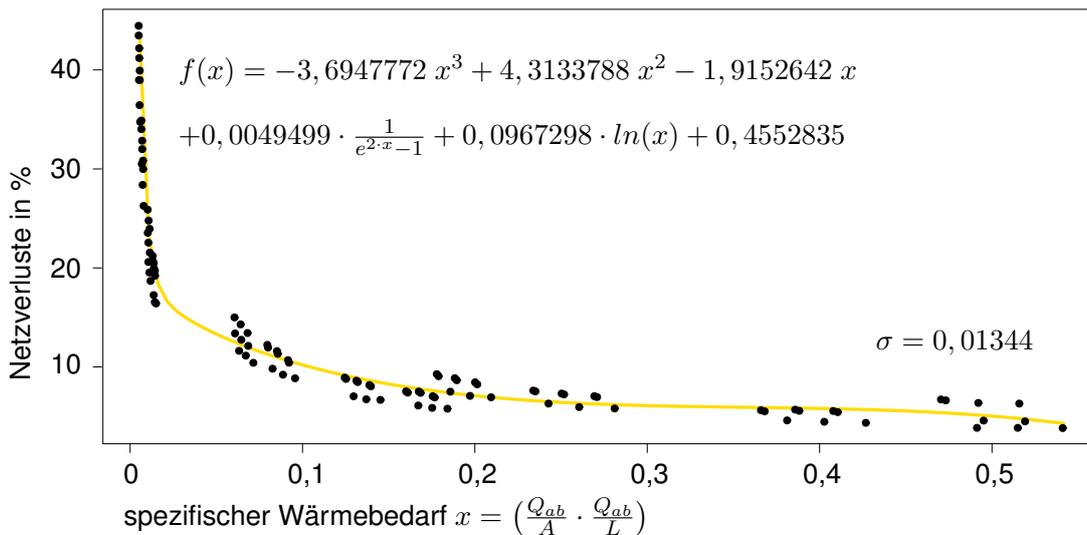


Abbildung 109 Regression Netzverluste mit kombinierter Funktion vor Optimierung

Optimierung durch Faktor

Im Leitfaden Energienutzungsplan liegt der überschlägige Schwellenwert der Wärmebedarfsdichte für Nahwärmenetze bei $150 \frac{\text{MWh}}{\text{ha} \cdot \text{a}}$ bzw. $15 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$ [3, S. 48]. Für den längenbezogenen Wärmebedarf wird im C.A.R.M.E.N. Merkblatt: „Nahwärmenetze und Bioenergieanlagen - Ein Beitrag zur effizienten Wärmenutzung und zum Klimaschutz“ [5, S. 3] der Wert $1.500 \frac{\text{kWh}}{\text{m} \cdot \text{a}}$ als Minimalziel angegeben. Da nun zwischen dem flächenbezogenen Wert ($15 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$) und dem längenbezogenem Wert ($1.500 \frac{\text{kWh}}{\text{m} \cdot \text{a}}$) ein Faktor 100 liegt, wird nun in einem iterativen Prozess ermittelt, ob ein Multiplikator am flächenbezogenen spezifischen Wärmebedarf einen positiven Einfluss auf die Standardabweichung σ hat und welcher Wert hierbei die größere Verbesserung hervorbringt.

$$x = \left(\frac{i \cdot Q_{ab}}{A} \cdot \frac{Q_{ab}}{L}\right) \quad (36)$$

Die Iteration der Werte erfolgt in ganzzahligen Schritten nach Gleichung 36. Hierzu wird das Intervall $[1; 220] := \{i \in \mathbb{N} \mid 1 \leq x \leq 220\}$ durchlaufen.

Der Kurvenverlauf dieser Iteration ist in Abbildung 110 dargestellt. Der Verlauf erinnert an den kleinen griechischen Buchstaben ϑ . Das Optimum dieser Kurve liegt im Minimum bei $i = 120$. Hier hat die Standardabweichung σ den Wert 0,01315.

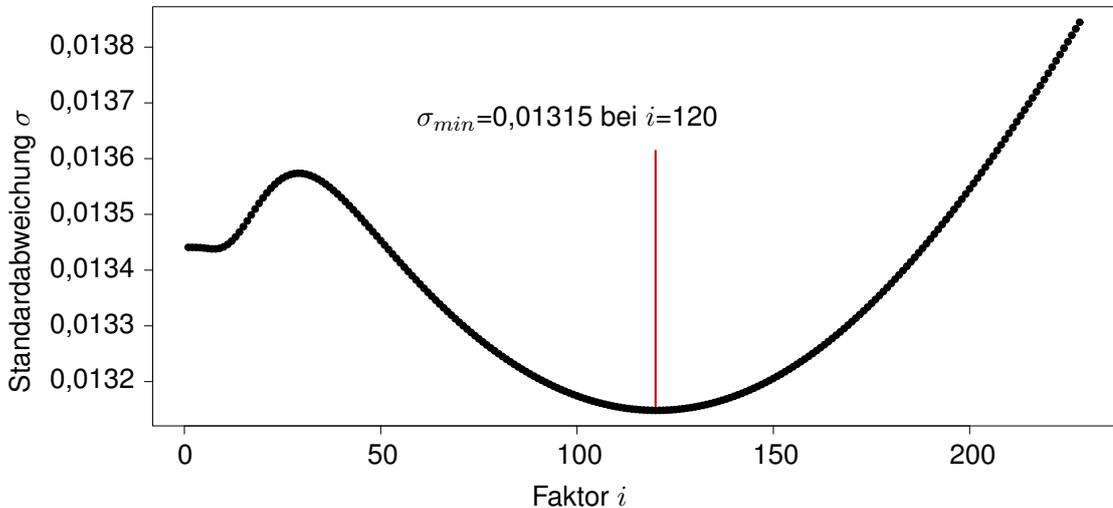


Abbildung 110 Optimierung der Standardabweichung durch Faktor i

Nun wird der flächenbezogene Wärmebedarf mit dem Faktor 120 multipliziert und die Regression mit der Gleichung 35 erneut durchgeführt. In Abbildung 111 ergibt sich eine neue Regressionsformel, die nun eine Standardabweichung von $\sigma = 0,01315$ erreicht.

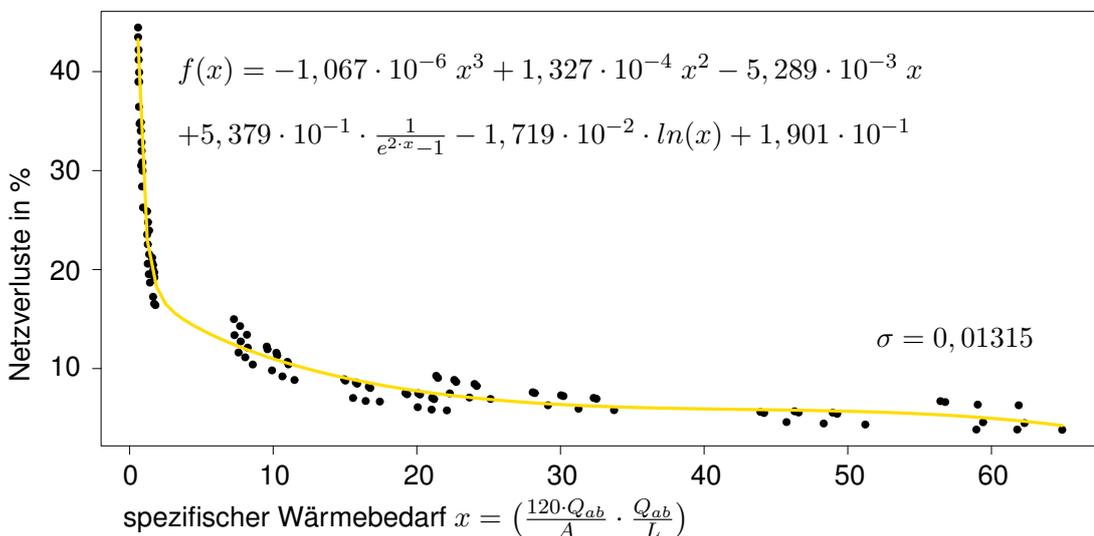


Abbildung 111 Regression Netzverluste mit kombinierter Funktion nach Optimierung

Diese Formel wird nun für den Algorithmus aus Abbildung 80 verwendet, um damit die Netzverluste zu prognostizieren. Somit sind für beide Regressionen die Regressionsformeln ermittelt, so dass nun im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Validierung des gesamten Algorithmus zur Ermittlung der Wärmenetzverluste erfolgen kann.

3.3.7 Vergleich des Verfahrens mit einfachen Methoden

In diesem Kapitel wird das Verfahren zur Berechnung der Wärmenetzverluste über die Regressionsformel aus Abbildung 111 mit einfachen Methoden aus der Literatur verglichen.

Längenbezogene Kennwerte

In der Kategorie der längenbezogenen Vorgehensweise wird der Anschlusswärmebedarf (Q_{ab}) auf die Netzlänge bezogen und in ein Diagramm eingetragen. Legt man über die Punkte eine Kurve, so kann man aus dem Diagramm zu jeder Anschlusswärmedichte den entsprechenden Netzverlust ablesen. Solche Diagramm finden sich bei C.A.R.M.E.N. [5], Engelmann und Krimmling (FWI 11/1998), Thalmann et al. (Verenum) und Nussbaumer et al. [102] (entspricht Verenum). In Abbildung 112 sind diese Quellen eingearbeitet.

Über eine Regressionsanalyse wird eine Logarithmische Funktion ermittelt, welche die Punktwolke am besten beschreibt. Mit dieser Funktion werden nun für alle 180 Netzvarianten aus Abschnitt 3.4.1 die Netzverluste berechnet. Anschließend wird die Berechnung der Netzverluste mit der Regressionsformel aus Abbildung 111 durchgeführt und beide Ergebnisse gegenübergestellt.

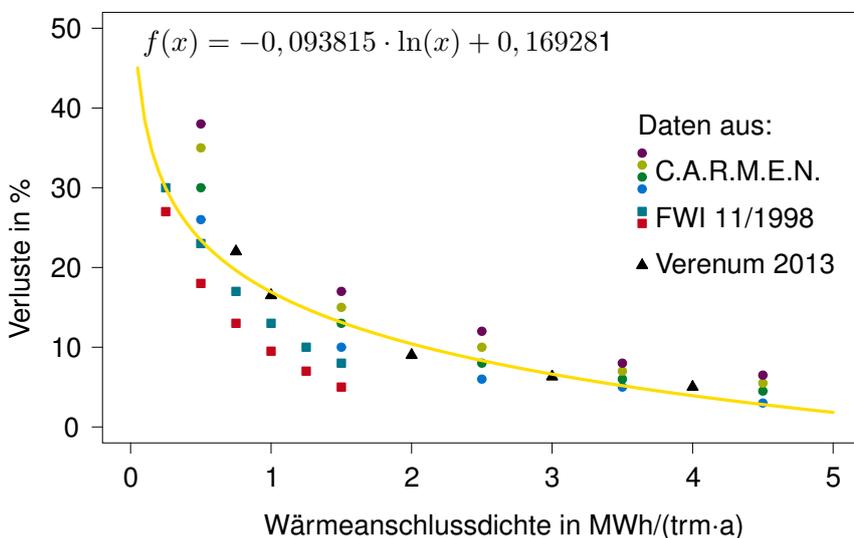


Abbildung 112 Regression Netzverluste aus unterschiedlichen Quellen (Quelle: In Anlehnung an [5][13][98][102])

Die Übersicht in Abbildung 113 zeigt, dass hier die Netzverlustermittlung über die Regressionsformel deutlich besser funktioniert als über die auf die Netzlänge bezogenen Benchmarkwerte. Die Spannweite dieser Benchmarkmethode beträgt 10,3 %, das untere Quartil liegt bei -2,0 %, das obere bei 0,9 %. Daraus errechnet sich der IQR zu 2,9 % und ist damit nur etwas geringer als die Spannweite der Werte aus der Regressionsformel mit 4,2 %.

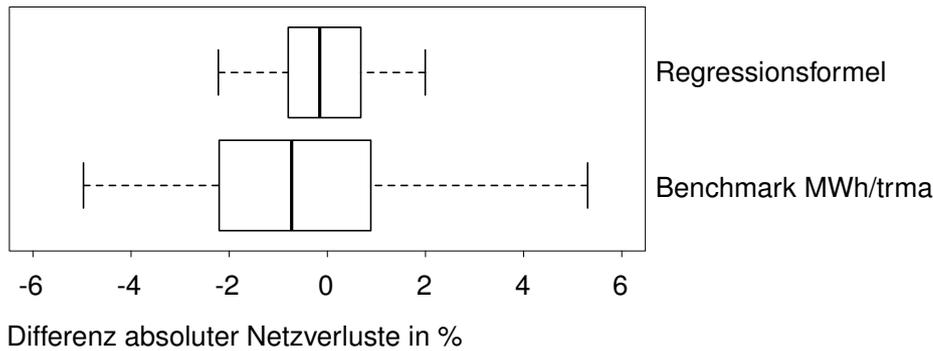


Abbildung 113 Differenz simulierter und berechneter Netzverluste

Flächenbezogene Kennwerte

Basis dieses Vergleichs ist die Untersuchung von Engelmann und Krimmling [13, S. 21]. Diese veröffentlichen in ihrem Artikel „Vorausberechnung der Wärmeverluste von Fernwärmenetzen“ ein Diagramm, das den Zusammenhang der flächenbezogenen Wärmedichte [MW/km^2] und dem Jahresnutzungsgrad der Verteilung zeigt. Hierin beschreibt die grüne Kurve eine logarithmische Approximation vier realer Wärmenetze und die rote Kurve eine logarithmische Approximation vier berechneter Wärmenetze. Bei näherer Betrachtung stellt sich heraus, dass in der Legende die Leistungsangabe kW anstatt der angegebenen MW lauten muss. In Abbildung 114 sind diese Kurven durch Punkte in den jeweiligen Farben dargestellt. Über diese Punkte erfolgt eine logarithmische Regression, welche als gelbe Kurve eingetragen ist. Die aus der Regression gebildete Gleichung berücksichtigt die Korrektur der flächenbezogenen Leistungsangabe.

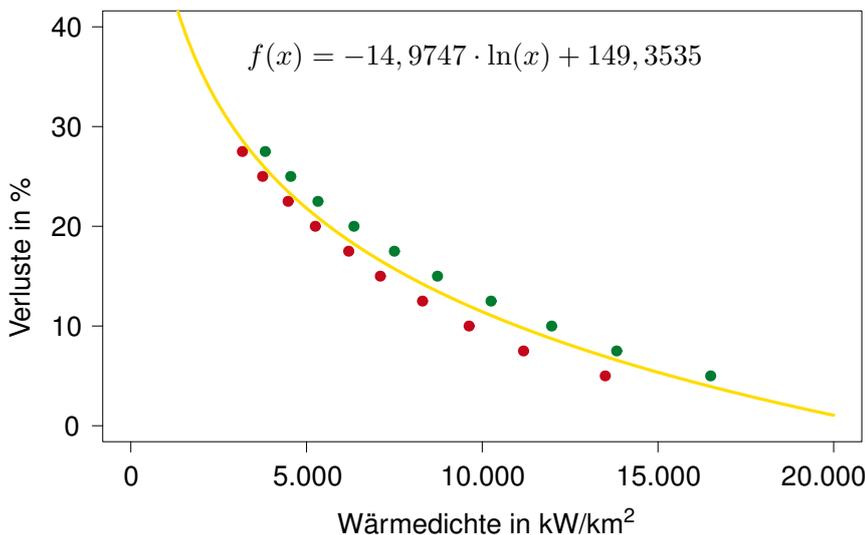


Abbildung 114 Regression Netzverluste mit logarithmischer Regression (Quelle: In Anlehnung an [13, S. 21])

Zur Umrechnung von Wärmemenge auf Wärmeleistung, werden die Vollbenutzungsstunden nach VDI 2067 Blatt 2 [103, S. 11] verwendet. Hier wird der Mittelwert für Einfamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser gewählt. Dieser wird zuvor auf die Region Potsdam klimabereinigt, weil dies nach Energieeinsparverordnung als Referenzklima für Deutschland definiert ist und

es deshalb für die Simulationen verwendet wird. Die klimabereinigten Vollbenutzungsstunden betragen 2.336 h/a. Zudem stellt sich nach Winter, Haslauer und Obernberger [104] in Wärmenetzen, in Abhängigkeit der Anzahl an Wärmeabnehmer, eine Gleichzeitigkeit der Leistung ein. Dies ist bei einer Umrechnung von Netzleistung in Wärmeenergie zu berücksichtigen. In Abbildung 115 ist die hierzu erforderliche Kurve mit zugehöriger Funktion dargestellt.

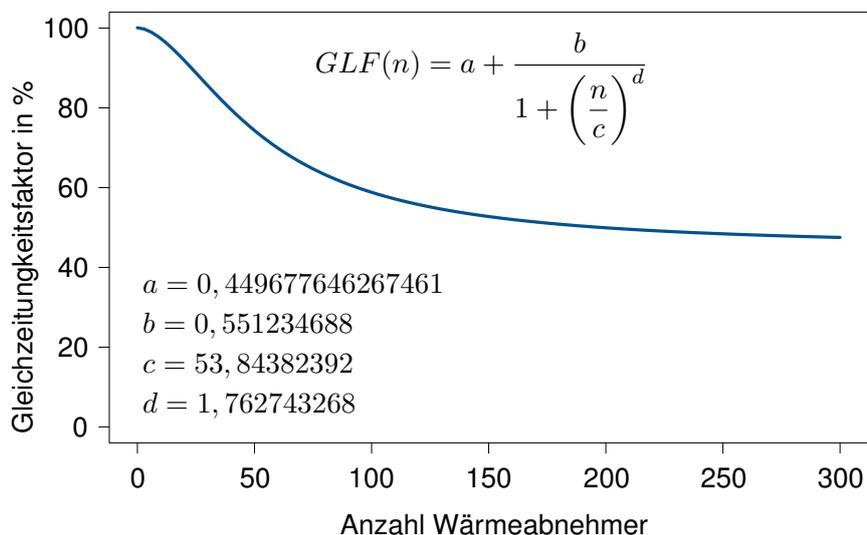


Abbildung 115 Näherungsfunktion der Gleichzeitigkeit in Wärmenetzen (Quelle: In Anlehnung an [104])

Zur Berechnung der Netzverluste wird, für jede der 180 Simulationsvarianten, die Wärmeabsatzdichte in MWh/(ha·a) gebildet. Diese wird mit dem Faktor 100.000 multipliziert, um die Einheiten in kWh/km²a umzurechnen. Anschließend erfolgt, die Umrechnung von Wärmeenergie in Wärmeleistung. Hierzu werden die einzelnen Werte durch 2.336 Vollbenutzungsstunden pro Jahr geteilt. Das Ergebnis sind kW/km². Jedoch ist hierbei noch nicht die in Wärmenetzen auftretende Gleichzeitigkeit berücksichtigt. Dies erfolgt durch den Gleichzeitigkeitsfaktor nach Winter, Haslauer und Obernberger [104]. In Abhängigkeit der Anschlussnehmeranzahl wird für jeden der 180 Werte ein Gleichzeitigkeitsfaktor errechnet, mit dem die Wärmedichte multipliziert wird. Die Ergebnisse werden in die Gleichung aus Abbildung 114 eingesetzt und ergeben so die Netzverluste.

Der Vergleich der Abweichung von simulierten Netzverlusten, abzüglich der mit dieser Methode berechneten Netzverluste in absoluten Prozenten, ist in Abbildung 116 dargestellt. Hier ist ersichtlich, dass die Methode mit dem Algorithmus aus Abbildung 117 die wesentlich präzisere Prognose erstellt. Bei der über den Benchmark kW/km² erfolgten Prognosemethode reicht die Spannweite von -12,8% bis 14,8% und ist im Vergleich mit der Methode des in dieser Arbeit entwickelten Algorithmus deutlich größer. Hier reicht die Spannweite von -2,2% bis 2,0%.

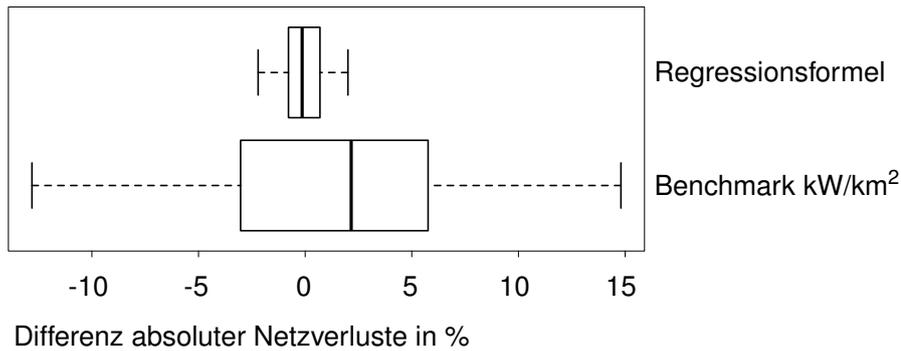
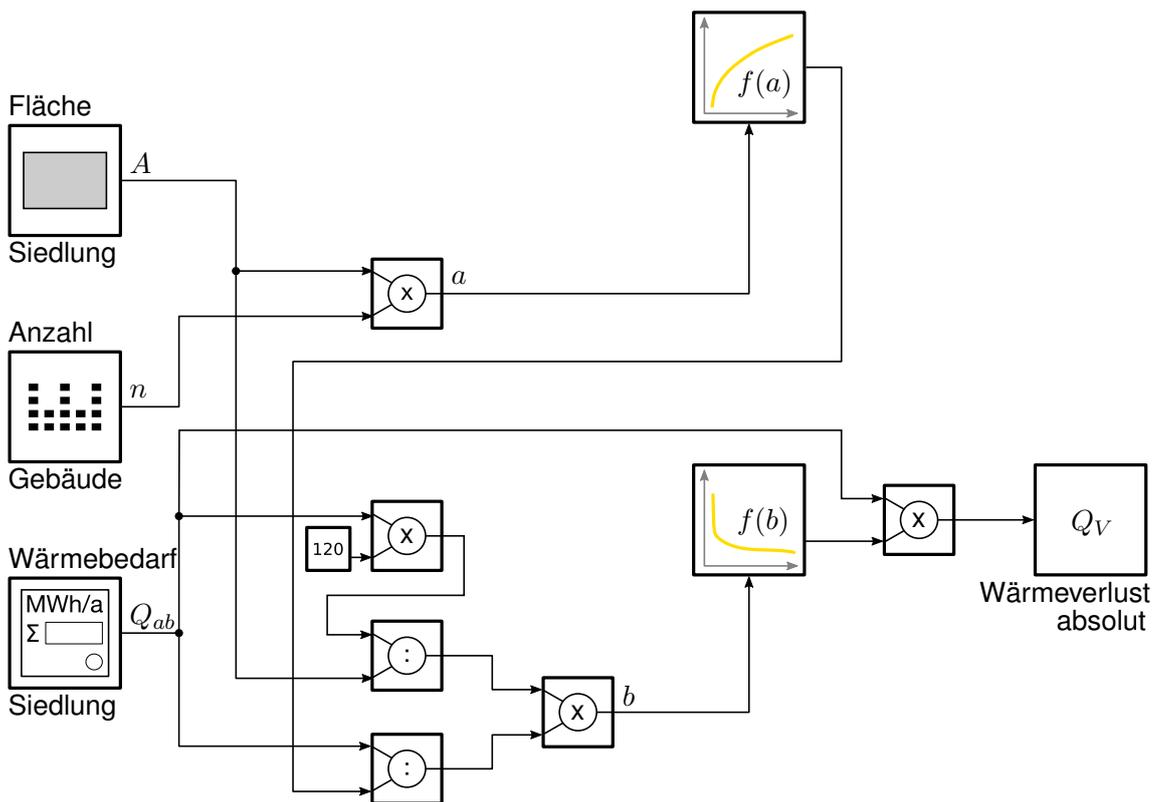


Abbildung 116 Differenz simulierter und berechneter Netzverluste

3.4 Resultierender Algorithmus

In Abbildung 117 ist der Algorithmus mit den beiden zuvor entwickelten Funktionen dargestellt. Die Anwendung ermöglicht es, lediglich über die drei Parameter A , n , und Q_{ab} den absolute Wärmeverlust Q_V eines Wärmenetzes berechnet zu können.



$$f(a) = -1,784 \cdot 10^2 \cdot \ln(a + \sqrt{a^2 + 1}) + 1,171 \cdot \sqrt{a} - 9,185 \cdot 10^{-6} \cdot a + 2,371 \cdot 10^3$$

$$f(b) = -1,067 \cdot 10^{-6} b^3 + 1,327 \cdot 10^{-4} b^2 - 5,289 \cdot 10^{-3} b + 5,379 \cdot 10^{-1} \cdot \frac{1}{e^{2 \cdot b} - 1} - 1,719 \cdot 10^{-2} \cdot \ln(b) + 1,901 \cdot 10^{-1}$$

Abbildung 117 Endgültiger Algorithmus mit den beiden Funktionen $f(a)$ und $f(b)$

Über die erste Funktion $f(a)$ wird zunächst aus dem Produkt a der beiden Eingangsgrößen Siedlungsfläche A und Gebäudeanzahl n die Netzlänge berechnet. Mit der zweiten Funktion

$f(b)$ wird anschließend der absolute Wärmeverlust in MWh/a berechnet. Die hierbei verwendete Eingangsvariable b berechnet sich aus dem Produkt der des längenbezogenen Wärmebedarfs und dem flächenbezogenen Wärmebedarfs. Der längenbezogene Wärmebedarf wird gebildet, indem der Siedlungswärmebedarf Q_{ab} durch die Netzlänge aus $f(a)$ dividiert wird. Zur Bildung des flächenbezogenen Wärmebedarfs wird der Siedlungswärmebedarf zuerst mit dem Faktor 120 multipliziert und anschließend durch die Siedlungsfläche A dividiert.

Im weiteren Validierungsverfahren wird der, auf die in das Netz eingespeiste Wärmemenge bezogene, relative Wärmeverlust verwendet. Zur Umrechnung in diesen relativen Wert dient Gleichung 32.

3.4.1 Validierung des resultierenden Verfahrens

In den Abschnitten 3.2 und 3.3 wurden die Funktionen $f(a)$ und $f(b)$ zum Algorithmus in Abschnitt 3.1 auf Basis eines synthetischen Siedlungsmodells entwickelt. In diesem Abschnitt wird nun überprüft, wie valide die Ergebnisse des Algorithmus sind. Hierzu werden die Wärmeverluste von Netzen erhoben und mit den Prognosewerten des Algorithmus verglichen.

Synthetische Netze $n = [14, 18]$

Für die erste Validierung werden synthetische Netze nach dem Verfahren aus Abschnitt 3.3 erzeugt, wobei hier die Netzgrößen zwischen den ursprünglichen gewählt werden, indem die Anzahl der Gebäude mit 14 und 18 gewählt wird. Die Anordnung der Gebäude ist in Abbildung 118 ersichtlich.

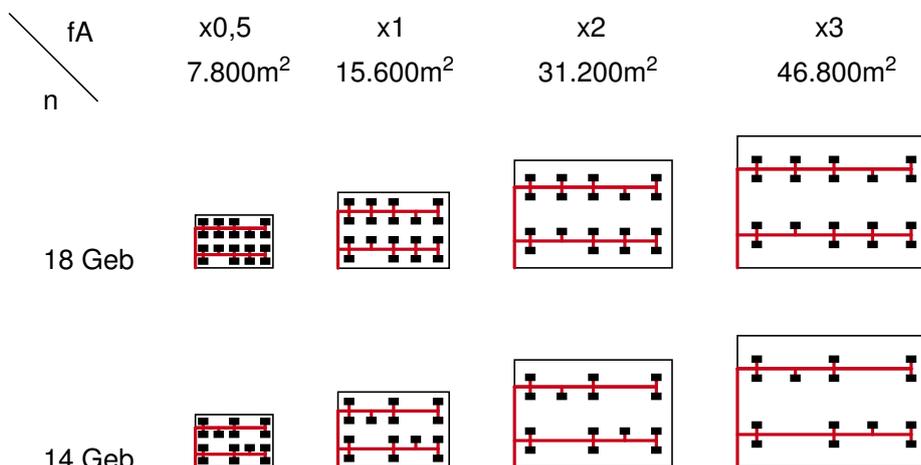


Abbildung 118 Wärmenetzmodell Faktoren fA und $n=[14,18]$

Für die so erzeugten 72 Varianten wird jeweils eine Simulation des Wärmenetzes durchgeführt und eine Prognose durch den Algorithmus erstellt. Diese Wertepaare sind in Abbildung 119 als Punktwolke dargestellt. Die gestrichelten Linien grenzen den Bereich einer 5%-tigen Abweichung ab. Die Ausreißerpunkte sind rot eingefärbt.

In Abbildung 120 sind die Differenzen der beiden Wärmeverluste ($Q_{sim} - Q_{ber}$) in absoluten

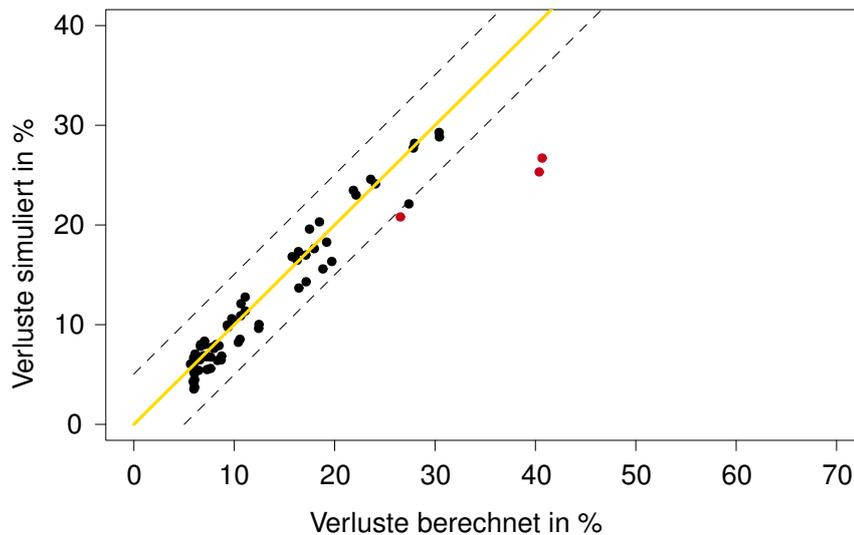


Abbildung 119 Vergleich simulierter und berechneter absoluter Netzverluste $n=[14,18]$

Prozentwerten als Boxplotdiagramm aufgeführt. Dieses Boxplotdiagramm zeigt die Spannweite der Abweichungen auf. Der IQR liegt zwischen dem unteren Quartil mit $-0,9\%$ und dem oberen Quartil mit $1,6\%$. Der Median befindet sich bei $0,2\%$. Hieraus kann man eine leichte Verschiebung in den positiven Bereich ausmachen. Dies bedeutet, dass die berechneten Werte eher etwas zu niedrig ausfallen. Diese Verschiebung wird auch an den beiden Whiskern deutlich. Der untere Whisker liegt bei $-2,1\%$, der obere Whisker ohne Ausreißer liegt bei $5,3\%$. Unter Berücksichtigung der Ausreißer steigt dieser Wert auf $15,1\%$. Die gesamte Spannweite beträgt ohne Ausreißer $7,4\%$. Dies schließt $95,8\%$ aller Werte ein. Betrachtet man den IQR, welcher 50% aller Werte umfasst, liegt die Differenz bei nur mehr $2,5\%$.

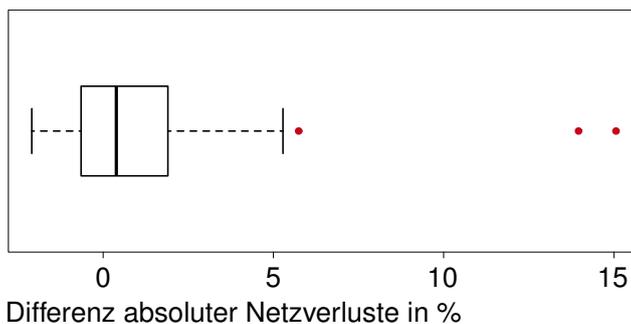


Abbildung 120 Differenz simulierter und berechneter Netzverluste $n=[14,18]$

In Tabelle 28 werden die Werte dieser Validierung nach Abweichung absteigend sortiert dargestellt. Bei den zwei Ausreißern mit hoher Abweichung handelt es sich jeweils um die kleinsten Netze mit der geringsten Wärmedichte. Auf das einzelne Gebäude bezogen, erreicht dies einen absoluten Energiebedarf im Bereich von 4.600 bis 7.700 kWh/a . Dies führt bei der Bestimmung der Netzlängen zur Überschätzung dieser und erklärt damit die Ausreißer. Die Überschätzung der Netzlänge mag daran liegen, dass diese Netzvarianten bei der Regression die untere Grenze bilden (vgl. Abbildung 94). Ebenso gut ist hier aber auch zu sehen, dass bereits nach 5 von 72 Werten die Abweichung weniger als $3,5\%$ beträgt.

Tabelle 28 Analyse der Ausreißer der Validierung n = [14, 18]

Fläche Quartier m ²	Anzahl Gebäude	Wärmebedarf MWh/a	Netzlänge original trm	Netzlänge berechnet trm	Δ Verlust (ber. - sim.)
7.800	14	118	316	564	15,1%
7.800	18	118	336	570	14,0%
15.600	14	236	474	599	5,7%
15.600	18	236	510	627	5,3%
31.200	18	471	655	758	3,4%
31.200	14	471	619	700	3,2%

Synthetische Netze n = [12, 14, 16, 18, 20]

Für die zweite Validierung werden synthetische Netze nach dem Verfahren aus Abschnitt 3.3 erzeugt. Hierbei wird für die Gebäudeanzahl n = [12, 14, 16, 18, 20] verwendet. Für die so erzeugten 180 Varianten wird jeweils eine Simulation des Wärmenetzes durchgeführt und eine Prognose durch den Algorithmus erstellt. Diese Wertepaare sind in Abbildung 121 als Punktwolke dargestellt. Die gestrichelten Linien grenzen den Bereich einer 5 %-tigen Abweichung ab. Die Ausreißerpunkte sind in rot eingefärbt.

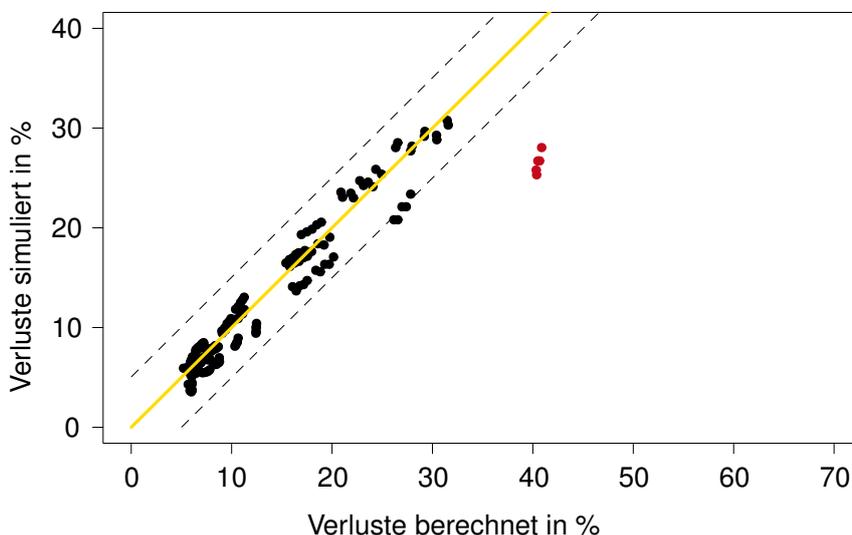
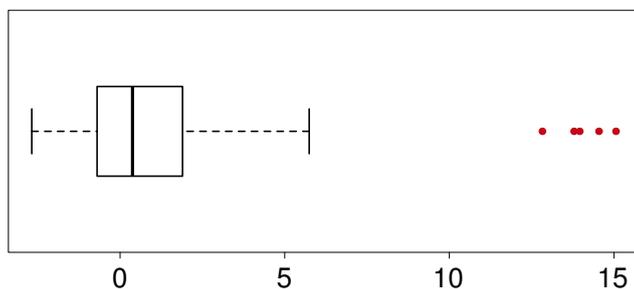


Abbildung 121 Vergleich simulierter und berechneter Netzverluste n=[12,14,16,18,20]

In Abbildung 122 sind die Differenz der beiden Wärmeverluste ($Q_{sim} - Q_{ber}$) in absoluten Prozentwerten als Boxplotdiagramm aufgeführt. Der IQR liegt zwischen -0,9% und 1,6%. Der Median liegt bei 0,2%. Hieraus kann man eine leichte Verschiebung in den positiven Bereich ausmachen. Dies bedeutet, dass die berechneten Werte eher etwas zu hoch ausfallen. Diese Verschiebung wird auch an den beiden Whiskern deutlich. Der untere Whisker liegt bei -2,7%, der obere Whisker ohne Ausreißer bei 5,7%. Unter Berücksichtigung der Ausreißer

steigt dieser Wert auf 15,1 %. Die gesamte Spannweite beträgt ohne Ausreißer 8,4 %. Dies schließt 97,2 % aller Werte ein. Betrachtet man den Bereich innerhalb der Box, so liegt hier der IQR bei nur 2,5 %.



Differenz absoluter Netzverluste in %

Abbildung 122 Differenz simulierter und berechneter Netzverluste $n=[12,14,16,18,20]$

In Tabelle 29 werden die Werte dieser Validierung nach Abweichung absteigend sortiert dargestellt. Bei den fünf Ausreißern mit hoher Abweichung handelt es sich jeweils um die kleinsten Netze mit der geringsten Wärmedichte. Auf das einzelne Gebäude bezogen, erreicht dies einen absoluten Energiebedarf von lediglich 8.400 bzw. 6.600 kWh/a. Dies führt bei der Bestimmung der Netzlängen zur Überschätzung dieser und erklärt damit die Ausreißer. Die Überschätzung der Netzlänge mag daran liegen, dass diese Netzvarianten bei der Regression die untere Grenze bilden (vgl. Abbildung 94). Ebenso gut ist hier aber auch zu sehen, dass bereits nach 5 von 180 Werten die Abweichung weniger als 5,8 % beträgt.

Tabelle 29 Analyse der Ausreißer der Validierung $n=[12, 14, 16, 18, 20]$

Fläche Quartier m^2	Anzahl Gebäude	Wärmebedarf MWh/a	Netzlänge original trm	Netzlänge berechnet trm	Δ Verlust (ber. - sim.)
7.800	14	118	316	564	15,1%
7.800	12	118	306	563	14,6%
7.800	18	118	336	570	14,0%
7.800	16	118	326	566	13,8%
7.800	20	118	346	575	12,9%
15.600	14	236	474	599	5,7%

Reale Wärmenetze

Im weiteren Verlauf wird der Algorithmus an realen Wärmenetzen validiert. Hierzu werden zu jedem Wärmenetz die Anzahl der Hausanschlüsse, die Netzgebietfläche (m^2), die Wärmeabatzmenge (MWh/a) und der auf die eingespeiste Wärmemenge bezogene Netzverlust (%) ermittelt. Anschließend werden die Netzverluste anhand der Netzdaten mit dem Algorithmus

berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 30 zusammengefasst. Der obere Teil der Tabelle enthält Wärmenetze mit überwiegender Wohnnutzung und Verlegung im Erdreich. Der untere Teil enthält die Wärmenetze die neben Erdleitungen auch aus Freileitungen bestehen oder kaum über die im Wohngebäudebereich übliche Grundlast verfügen. Die hierdurch resultierenden höheren Netzverluste sind in Tabelle 30 ersichtlich. Diese Wärmenetze sind aufgeführt, um zu demonstrieren, dass auch hier die Abweichung weniger als 10 % beträgt.

Tabelle 30 Validierung mit realen Wärmenetzen

Projekt	Fläche m²	Netzverluste original %	Netzverluste berechnet %	Δ Verlust (ori.-ber.) %
NN1	196.583	17,58	20,66	-3,08
Weingarten Strang saniert	19.937	11,87	9,23	2,64
Weingarten Strang unsaniert	11.950	5,91	4,92	0,99
NN2	549.599	11,23	9,70	1,53
Mauenheim	214.456	38,00	36,46	1,54
Büsingen	368.891	17,80	25,34	-7,54
Landwasser	540.000	5,80	6,04	-0,24
Stetten Süd	230.000	18,53	15,40	3,13
Vauban	370.000	9,56	12,82	-3,26
Zentrum Oberwiehre	30.000	7,00	9,39	-2,39
Alter Schlachthof Speyer	22.267	22,64	14,58	8,06
FWI 11/98 Netz1	600.000	12,01	9,59	2,42
FWI 11/98 Netz2	1.500.000	13,59	7,59	6,00
FWI 11/98 Netz3	2.000.000	21,52	13,17	8,35
FWI 11/98 Netz4	3.500.000	10,84	6,10	4,74
Neuekerode	259.881	19,64	9,99	9,65

Die einzelnen Wärmenetze im oberen Bereich haben einen überwiegenden Anteil an Wohnbebauung und weisen deshalb den dafür typischen Jahresverlauf der Wärmelast auf.

Das anonymisierte Projekt NN1 liegt in einer Gemeinde mit ca. 4.500 Einwohner im Süden Bayerns. Hier sind 26 Gebäude an das 1,66 km lange Nahwärmenetz angeschlossen. Die Wärmebedarfsdichte liegt hier bei 96 MWh/(ha·a). Es werden 1.381 kWh/(trm·a) durchgeleitet. Der Algorithmus berechnet die Netzverluste um 3,08 % höher als die gemessenen Werte

ergeben.

Die beiden folgenden Projekte, Weingarten Strang Süd saniert und unsaniert, basieren auf Daten der Masterarbeit von Hendrik Schweichler aus dem Jahr 2018 [105]. In diesem südlichen Teil des Nahwärmesystems im Freiburger Stadtteil Weingarten teilt sich der Strang in zwei Teilstränge. Der eine Bereich, mit vier sanierten Wohnbauten, verläuft entlang Binzengrün und wird als Projekt „Weingarten Strang saniert“ bezeichnet. Die Gebäude weisen zusammen einen Jahreswärmebedarf von 1.047 MWh/a auf. Die Fläche des Gebiets ist mit 2 ha aus der OSM Karte [106] gemessen. Daraus folgt die Wärmebedarfsdichte mit 525 MWh/(ha·a). Auf dem 337 m langen Netzabschnitt ergibt sich eine Wärmelinienendichte von 3.525 kWh/(trm·a). Der zweite Teilstrang erstreckt sich über den Bereich an der Sulzburger Straße mit 1,2 ha. An diesen Strang sind drei Wohnblöcke im Originalzustand angebunden, weshalb die Projektbezeichnung „Weingarten Strang unsaniert“ lautet. Dieser Originalzustand zeigt sich auch in der Wärmebedarfsdichte mit 5.891 MWh/(ha·a) und der Wärmelinienendichte von 17.986 kWh/(trm·a). Der daraus resultierende hohe spezifische Wärmebedarf (x nach Abbildung 111) übersteigt den Bereich des Algorithmus. In diesem Fall wird mit einem maximalen $x = 70$ weiter gerechnet, da hier die Punkte in Abbildung 111 einen sehr flachen Verlauf bei ungefähr 5 % aufweisen. Der Vergleich mit den Originaldaten zeigt eine Unterschätzung der Netzverluste von unter 1 % und rechtfertigen somit dieses Vorgehen.

Das zweite anonymisierte Projekt mit der Bezeichnung NN2 liegt ebenfalls in einer Gemeinde im Süden Bayerns. Die Fläche des Netzgebiets beträgt 55,60 ha und beinhaltet ein Wärmenetz mit 18 km Länge. Die Wärmebedarfsdichte beträgt 495 MWh/(ha·a) und liegt nach dem Leitfaden Energienutzungsplan [3, S. 19] im mittleren Bereich. Die Wärmelinienendichte beträgt 1.721 kWh/(trm·a). Diese mittlere Dichte drückt sich auch in den Wärmenetzverlusten aus, welche im Original bei 11,23 % liegen und vom Algorithmus mit 9,70 % berechnet werden.

In seinem Artikel „Verluste in Wärmenetzen - Erfahrungen und Spannbreiten“ [107] stellt Nast zwei Wärmenetze gegenüber. Das erste befindet sich im Ortsteil Mauenheim der Baden-Württembergischen Gemeinde Immendingen. Das Wärmenetz wurde 2006 errichtet und versorgt ca. 70 Gebäude. Es erstreckt sich auf 21,4 ha Fläche und hat eine Länge von 4 km. Die Wärmebedarfsdichte fällt mit nur 80 MWh/(ha·a) sehr niedrig aus und erklärt so die 38 % Netzverluste. Mit einer Abweichung von lediglich -1,54 % werden diese auch vom Algorithmus ermittelt. Das zweite von Nast beschriebene Wärmenetz befindet sich in Büsingen am Hochrhein an der Grenze zur Schweiz. Das Wärmenetz aus dem Jahr 2012 ist 5,8 km lang und erstreckt sich über 36,9 ha Fläche. Die Wärmebedarfsdichte mit 102 MWh/(ha·a) liegt nur leicht über der in Mauenheim. Wegen dieser höheren Wärmebedarfsdichte und eines erhöhten Dämmstandards der Rohrleitungen, weist das Wärmenetz in Büsingen gemessene Netzverluste mit 16,8 % auf. Da der Algorithmus auf einem normalen Dämmstandard basiert, kann erklärt werden, weshalb hier zwischen gemessenen und berechneten Netzverlusten ein Unterschied von 7,5 % entsteht.

Die Daten zu den nächsten vier Wärmenetzen stammen aus der Masterarbeit von Jannis Klonk [108, S. 61 ff.]. Diese befinden sich in der Stadt Freiburg im Breisgau in unterschiedlichen Stadtteilen und der Stadt Lörrach. Das erste Netz im Stadtteil Landwasser erschließt auf 54 ha Fläche 64 Gebäude und hat eine Länge von 7,6 km. Sowohl die Wärmebedarfsdichte mit 523 MWh/(ha·a), als auch die hohe Wärmelinendichte mit 3.933 kWh/(trm·a) erklären die niedrigen Wärmenetzverluste von 5,8 %, welche mit 6,0 % vom Algorithmus sehr genau abgebildet werden. Das nächste in der Arbeit von Klonk dokumentierte Wärmenetz liegt im Lörracher Stadtteil Stetten Süd und beinhaltet auf 23 ha Fläche 112 angeschlossene Gebäude. Die Wärmebedarfsdichte beträgt lediglich 183 MWh/(ha·a) und führt zusammen mit einer Wärmelinendichte von 863 kWh/(trm·a) zu 18,5 % Netzverlusten. Die Prognose der Algorithmusrechnung liegt ca. 3 % darunter. Das folgende Wärmenetz befindet sich wieder in Freiburg im Breisgau, genauer im Stadtteil Vauban. Dieses erstreckt sich mit 6,71 km auf 37 ha. Trotz der relativ niedrigen Wärmebedarfsdichte von 309 MWh/(ha·a) betragen die Netzverluste lediglich 9,6 %. Dies erklärt sich durch die hohe Wärmelinendichte von 1.884 kWh/(trm·a). Der Algorithmus prognostiziert die Netzverluste mit 12,8 % und weicht somit um knapp 3 % ab. Das letzte 600 m lange Wärmenetz aus dieser Masterarbeit versorgt das Zentrum Oberwiehre in Freiburg. Auf einer Fläche von 3 ha sind hier 16 Gebäude angeschossen. Die Wärmebedarfsdichte beträgt 478 MWh/(ha·a) und führt zusammen mit 2.570 kWh/(trm·a) Wärmelinendichte lediglich zu 7,0 % Netzverlusten. Die Prognose des Algorithmus führt mit 9,4 % zu einer geringen Überschätzung.

Das nächste Projekt befindet sich im rheinland-pfälzischen Speyer. Hier wurde an der Stelle des alten Schlachthofs auf 2,2 ha ein Wohngebiet mit 61 Wohngebäuden entwickelt. Die Wärmeversorgung erfolgt über ein knapp 1,4 km langes Nahwärmenetz, welches sich zum Teil aus einer 554 m² großen Solaranlage speist. Die Wärmebedarfsdichte beträgt 302 MWh/(ha·a) und liegt mit 621 kWh/(trm·a) Wärmelinendichte vergleichsweise niedrig. Mit 22,6 % liegen die Netzverluste im Regelbetrieb (Wolff und Jagnow [109]) von denen, laut Coy und Wirth [110] ursprünglich projektierten 14,3 %, weit entfernt. Der Algorithmus berechnet mit 14,6 % fast exakt den Wert der Projektierung. Ein Erklärungsansatz liefern Coy und Wirth. Demnach wurde das Wärmenetz in der Umsetzung deutlich länger ausgeführt, als ursprünglich projektiert.

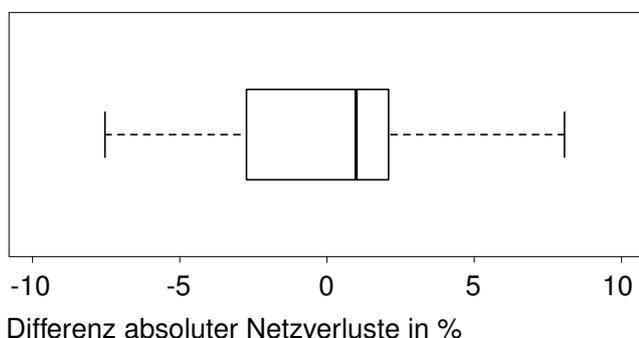


Abbildung 123 Differenz originaler und berechneter Netzverluste Projekte Wohnnutzung

In Abbildung 123 sind die Differenz der beiden Wärmeverluste in absoluten Prozentwerten als Boxplotdiagramm dargestellt. Dieses Boxplotdiagramm zeigt die Spannweite der Abweichung

der durch den Algorithmus berechneten Netzverluste im Vergleich zu den Originalwerten aus der Literatur auf. Das untere Quartil liegt bei -2,74 %, das obere Quartil bei 2,09 %. Der Median ist als senkrechter Strich innerhalb der Box eingetragen und liegt bei 0,99 %. Hieraus kann eine leichte Unterschätzung durch den Algorithmus ausgemacht werden. Dies bedeutet, dass die berechneten Werte eher etwas zu niedrig ausfallen. Der untere Whisker liegt bei -7,54 %, der obere Whisker liegt bei 8,06 %. Die gesamte Spannweite beträgt damit 15,60 %.

In diesem Absatz werden zusätzlich weitere Projekte abgehandelt, welche nicht vollständig der Zielgruppe dieses Algorithmus entsprechen. Die nächsten vier Projekte (FWI 11/98) stammen von Engelmann und Krimmling [13] und haben als Besonderheit einen Anteil an Freileitungen in unterschiedlicher Höhe. Diese Freileitungen haben direkten Kontakt zur Umgebungsluft und weisen deshalb höhere Netzverluste auf, als rein erdverlegte Wärmenetze. Die Höhe der Abweichung dieser Netzverluste, gegenüber der Berechnung durch den Algorithmus, korreliert mit dem Anteil an Freileitungen.

Als letztes Projekt wird das Wärmenetz von Neuekerode nach den Erhebungen von Jagnow und Wolff [41] aufgenommen. Das Netz versorgt auf einer Trassenlänge von 3,5 km 50 Gebäude jährlich mit 8.520 MWh Wärme, wobei 40 % der Gebäude keine Grundlastabnahme aufweisen. Daraus resultieren 19,6 % Wärmenetzverluste. Der Algorithmus basiert jedoch auf einer Netztypologie mit Grundlastabnahme und prognostiziert deshalb nur etwa die Hälfte der Wärmenetzverluste mit 10 %.

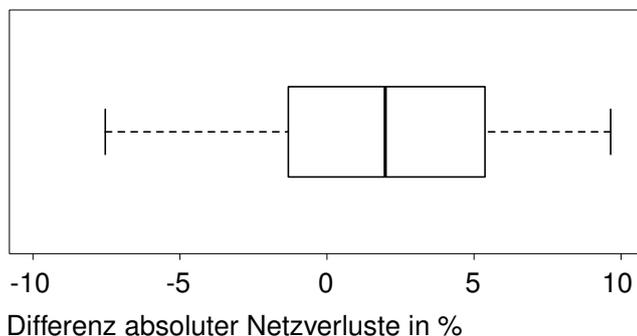


Abbildung 124 Differenz originaler und berechneter Netzverluste Projekte alle Arten

In Abbildung 124 sind die Differenz der beiden Wärmeverluste in absoluten Prozentwerten als Boxplotdiagramm dargestellt. Dieses Boxplotdiagramm zeigt die Spannweite der Abweichung, der durch den Algorithmus berechneten Netzverluste im Vergleich zu den Originalwerten aus der Literatur auf. Das untere Quartil liegt bei -0,78 %, das obere Quartil bei 5,08 %. Der Median ist als senkrechter Strich innerhalb der Box eingetragen und liegt bei 1,98 %. Hieraus kann eine Unterschätzung durch den Algorithmus ausgemacht werden. Dies bedeutet, dass die berechneten Werte eher zu niedrig ausfallen. Der untere Whisker liegt bei -7,54 %, der obere Whisker liegt bei 9,65 %. Die gesamte Spannweite beträgt damit 17,19 %. Mit der Erweiterung um diese Projekte soll demonstriert werden, dass der Algorithmus hier die Netzverluste zwar zu gering prognostiziert, jedoch auch hier die maximale Abweichung unterhalb von 10 % bleibt.

3.4.2 Vergleich des Verfahrens mit einfachen Methoden

In diesem Kapitel werden die beiden Verfahren zur Netzlängen- und Netzverlustberechnung mit einfachen Methoden am Beispiel der realen Wärmenetze verglichen.

Längenermittlung über Benchmark Trassenmeter je Wohneinheit

Wie der Abbildung 100 entnommen werden kann, führt die Methode „Trassenmeter je Wohneinheit“ zu einem schmälere IQR. Deshalb wird hier diese Methode für den Vergleich herangezogen. In Tabelle 31 wurden für alle Wärmenetze die Art der Bebauung bestimmt und die entsprechenden trm/WE Werte aus Tabelle 22 eingetragen. Anschließend werden die jährlich gelieferten Wärmemengen durch den Jahresdurchschnittswert eines Haushalts (15.128 kWh/a Quelle: statistisches Bundesamt [96]) geteilt. Die so erhaltenen Wohneinheiten werden anschließend mit dem Faktor trm/WE multipliziert. Die Ergebnisse können Tabelle 31 entnommen werden.

Im daraus angefertigten Boxplot aus Abbildung 125 ist zu erkennen, dass die Methode über die Regressionsformel deutlich bessere Ergebnisse liefert.

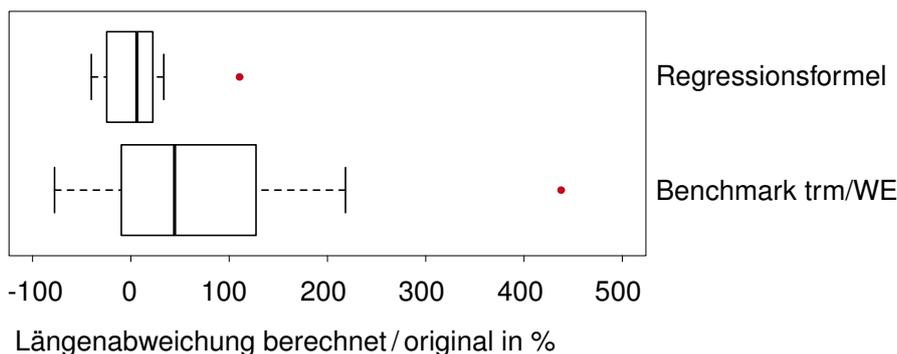


Abbildung 125 Vergleich der Längenabweichungen

Netzverlust über längenbezogenen Benchmark MWh/(trm-a)

Wegen der schlechten Qualität der zuvor getesteten Methode wird nun die Methode mit dem Benchmark MWh/trm verwendet. Diese zeigt bei manchen Netzen eine erstaunliche Übereinstimmung, hat dann aber auch wieder extreme Fehlprognosen, bis hin zu negativen Werten. Im Boxplotvergleich ist die Robustheit des Verfahrens über den Algorithmus gut im schmalen Interquartilsabstand abzulesen, der 50 % aller Werte widerspiegelt.

3.4.3 Erweiterung um die Anpassung der Netztemperaturen

Die Entwicklung der Wärmenetze geht in Richtung Niedertemperaturnetze bzw. kalter Nahwärmenetze. In ihrem Abschlussbericht: „Potenziale von Niedrigtemperaturnetzen zur Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien in Quartieren Niedrigtemperaturnetze in Quartieren“ zeigen Heissler et al. [2] anhand eines Immobilienentwicklungsprojektes die Potenziale dieser Netzarten auf. Das Projekt befindet sich auf dem Gelände der Ehemaligen Prinz-Eugen-

Tabelle 31 Validierung Netzlängenberechnung anhand realer Wärmenetze

Projekt	trm/WE	Netzlänge original (trm)	Netzlänge berechnet (trm)	Netzlänge aus trm/WE (trm)
NN1	19	1.660	2.092	2.374
Weingarten Strang saniert	4	337	564	277
Weingarten Strang unsaniert	4	416	597	1.861
NN2	19	19.000	15.668	34.539
Mauenheim	19	4.000	3.699	2.159
Büsingen	10	5.800	6.062	2.493
Landwasser	4	7.630	5.717	7.541
Stetten Süd	4	6.000	4.910	1.115
Vauban	4	6.710	10.489	3.022
Zentrum Oberwiehre	4	600	720	379
Alter Schlachthof Speyer	10	1.400	1.080	445
FWI 11/98 Netz1	4	6.227	5.987	4.765
FWI 11/98 Netz2	4	14.439	11.964	13.749
FWI 11/98 Netz3	4	22.900	17.256	8.448
FWI 11/98 Netz4	4	31.852	26.013	40.111
Neuekerode	4	7.138	3.390	2.242

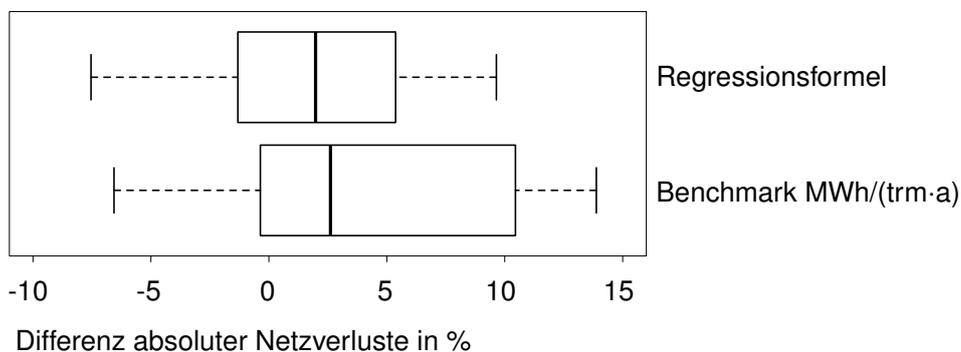


Abbildung 126 Differenz originaler und berechneter Netzverluste

Kaserne an der Cosimastraße in München. Im Zuge dieser Studie werden acht Szenarien entwickelt und über umfangreiche Simulationen berechnet.

Um nun solche Projekte mit dem in dieser Arbeit entwickelten Algorithmus nachzubilden, ist es erforderlich, einen Faktor zu entwickeln, der die unterschiedlichen Netztemperaturen berücksichtigt.

Die Wärmeverluste des Netzes werden maßgeblich von der treibenden Temperaturdifferenz bestimmt. Deshalb kann diese dazu verwendet werden, einen Anpassungsfaktor zu entwickeln, der es erlaubt Wärmeverluste in Netzen mit unterschiedlicher Temperaturbelegung umzurechnen.

Als Temperaturbasis gilt es zunächst, die durchschnittliche Erdreichtemperatur zu ermitteln. In Abschnitt 2.1.6 Abbildung 31 sind die Tagesmittelwerte der Erdreichtemperaturen von Augsburg⁸⁾ aus den Jahren 1951 bis 2016 in einer Tiefe von 2 cm dargestellt. Im selben Datensatz des Deutschen Wetterdienstes sind auch die Werte für eine Tiefe von 50 cm enthalten. Hier beträgt das arithmetische Mittel 9,2 °C. Wärmenetze werden in der Regel etwas tiefer verlegt, so dass für die Temperaturanpassung 10 °C eine realistische Größe darstellt.

In Abschnitt 3.3.4 werden die Temperaturen, welche für die Simulationen verwendet werden, hergeleitet. Um hier den überwiegenden Teil der Simulationsnetze zu treffen, wird für weitere Faktorenberechnung die Vorlauftemperatur mit durchschnittlich 85 °C und die Rücklauftemperatur mit 55 °C angenommen. So ergibt sich, wie in Abbildung 127 dargestellt, der Divisor zur Temperaturanpassung mit 120K.

Die Gleichung 37 beschreibt die Umrechnung des, vom Algorithmus prognostizierten, Netzverlustes $Q_{V85/55}$ in einen Netzverlust $Q_{Vx/y}$ beliebiger durchschnittlicher Netztemperaturen.

$$Q_{Vx/y} = \frac{Q_{V85/55}}{120} \cdot (\Delta\vartheta_{VE} + \Delta\vartheta_{RE}) \quad (37)$$

Der jährliche mittlere Abstand von Vorlauftemperatur zu Erdreichtemperatur wird mit Gleichung 38 berechnet.

$$\Delta\vartheta_{VE} = \vartheta_{VL} - \vartheta_E \quad (38)$$

Für die Berechnung auf der Rücklaufleitung wird Gleichung 39 verwendet.

$$\Delta\vartheta_{VR} = \vartheta_{RL} - \vartheta_E \quad (39)$$

⁸⁾ ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/climate/daily/soil_temperature/historical/tageswerte_EB_00232_19510101_20161231_hist.zip
(aufgerufen am 04.01.2018)

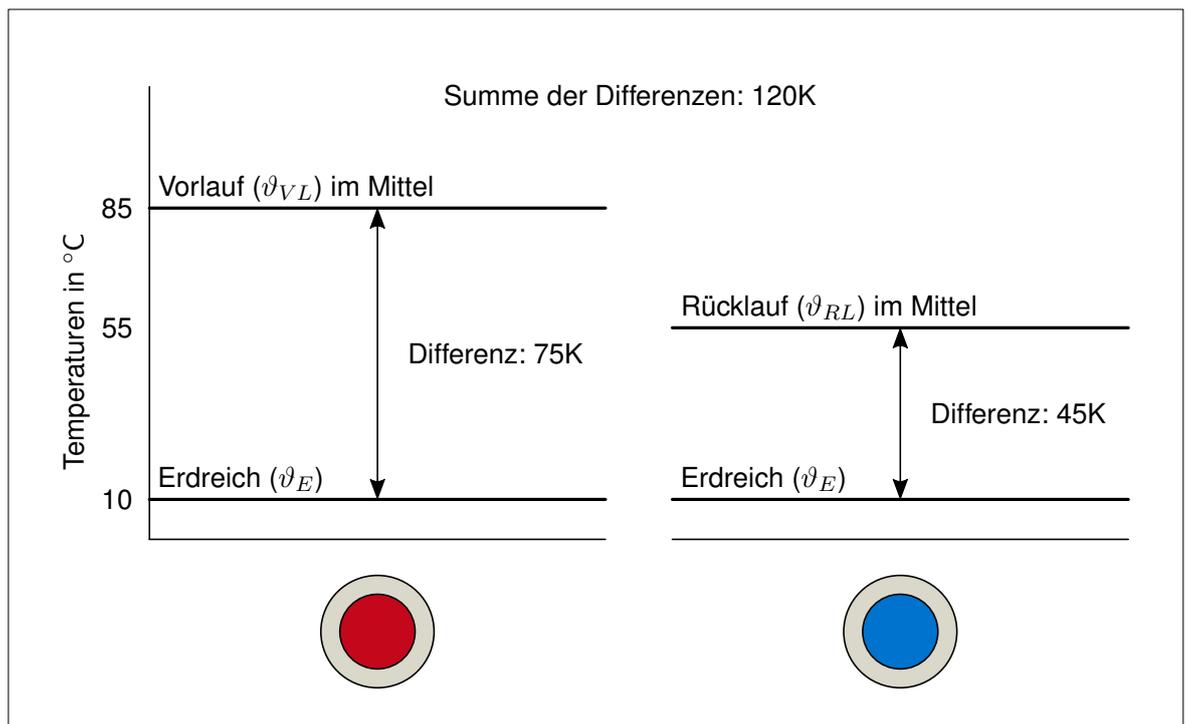


Abbildung 127 Entwicklung des Divisors zur Netztemperaturanpassung

Der Pythoncode aus Anhang A wird nun um die Anpassung der Netztemperaturen erweitert.

Dieses Verfahren wird nun am Beispiel aus der oben beschriebenen Studie nach Heissler et al. [2] validiert. Der erste Schritt ist das Ermitteln der Fläche des mit dem Wärmenetz versorgten Gebietes. Auf Seite 22 zeigen Heissler et al. eine Übersichtskarte mit dem Wärmenetz. Mit der Software QGIS und der hinterlegten Karte von OpenStreetmap kann das Versorgungsgebiet umrandet werden. Mit dem Geoprozess \$area wird die Fläche berechnet, diese beträgt 77.444 m^2 . In Anhang C ist die so entstandene Karte dargestellt.

Aus der Übersichtskarte nach Heissler et al. geht hervor, dass das Wärmenetz an 14 Stellen mit den Gebäuden verbunden wird. Eine erste Berechnung mit dem Algorithmus ergibt aus der Fläche 77.444 m^2 und 14 Hausanschlüssen eine Netzlänge von 944 trm. Im Bericht wird die Netzlänge mit 915 trm angegeben. Dies entspricht einer Abweichung von 3% und liegt nach Abbildung 99 innerhalb des IQR.

Die Wärmenetze in der Studie sind mit einer Dymola Simulation berechnet. Als Ergebnis sind für alle 9 Szenarien die absoluten Netzwärmeverluste, die Netzmitteltemperatur, der Gebäuwärmebedarf, der Wärmebezug aus dem Netz und die Wärmeeinspeisung in das Netz gegeben. Zur Bestimmung des prozentualen Wärmeverlustes ist es erforderlich zu definieren, woraus die Basis besteht. Hier gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten. Zum einen kann die

eingespeiste Wärmemenge wie in Gleichung 32 aus Netzverlust und Gebäudewärmebedarf berechnet werden (Variante 1). Zum anderen kann anstelle des Gebäudewärmebedarfs die im Netz transportierte Wärmemenge verwendet werden (Variante 2).

In Tabelle 32 ist die erste Variante dargestellt, bei der sich die Werte auf den Gebäudewärmebedarf beziehen.

Tabelle 32 Validierung Temperaturanpassung anhand Cosimastraße Variante 1 (Quelle: Daten aus [2])

Szenario	Wärmebedarf MWh/a	mittlere Netztemperatur °C	Netzverlust orig.		Netzverlust ber.		Netzverlust ber./orig. %
			MWh/a	%	MWh/a	%	
0	2.166	18,2	41	1,9	41	1,9	100
1	1.703	18,4	41	2,4	38	2,2	93
2	3.821	19,3	46	1,2	47	1,2	102
3	1.945	20,0	48	2,4	48	2,4	100
4	2.312	17,6	36	1,5	38	1,6	106
5	2.152	20,3	50	2,3	51	2,3	102
6	2.166	21,1	41	1,9	55	2,5	134
7	2.167	18,3	39	1,8	41	1,9	105
8	2.194	84	282	11,4	363	14,2	129

Der Boxplot nach Variante 1 zeigt in Abbildung 128 den Quotienten der durch den Algorithmus berechneten Netzverluste bezogen auf die angegebenen Netzverlustangaben aus der Studie nach Heissler et al. [2] in Prozent.

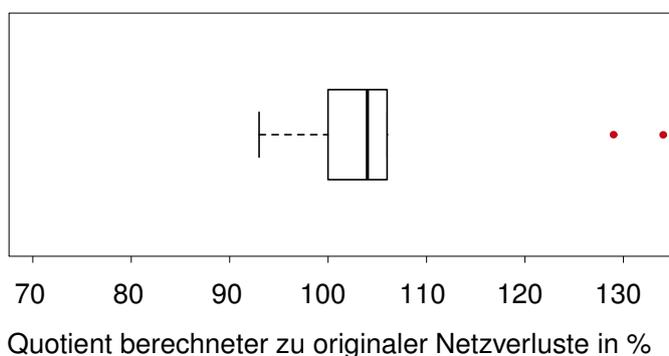


Abbildung 128 Quotient Netzverluste Variante1

In Tabelle 33 ist die zweite Variante dargestellt, bei der sich die Werte auf die im Wärmenetz transportierte Menge beziehen.

Tabelle 33 Validierung Temperaturanpassung anhand Cosimastraße Variante 2 (Quelle: Daten aus [2])

Szenario	Wärme- bedarf MWh/a	mittlere Netztempe- ratur °C	Netzverlust orig.		Netzverlust ber.		Netzverlust ber./orig.
			MWh/a	%	MWh/a	%	%
0	1.810	18,2	41	2,2	38	2,1	93
1	1.352	18,4	41	2,9	34	2,5	83
2	3.464	19,3	46	1,3	48	1,4	104
3	1.815	20,0	48	2,6	47	2,5	98
4	1.808	17,6	36	2,0	35	1,9	97
5	1.812	20,3	50	2,7	48	2,6	96
6	1.777	21,1	41	2,3	51	2,8	124
7	1.644	18,3	39	2,3	37	2,2	95
8	2.194	84	282	11,4	363	14,2	129

Der Boxplot nach Variante 2 zeigt in Abbildung 129 den Quotienten der durch den Algorithmus berechneten Netzverluste bezogen auf die angegebenen Netzverlustangaben aus der Studie nach Heissler et al. [2] in Prozent. Durch den Bezug auf die tatsächlich durchgeleitete Wärmemenge, liegen die Werte mittiger verteilt als in Variante 1.

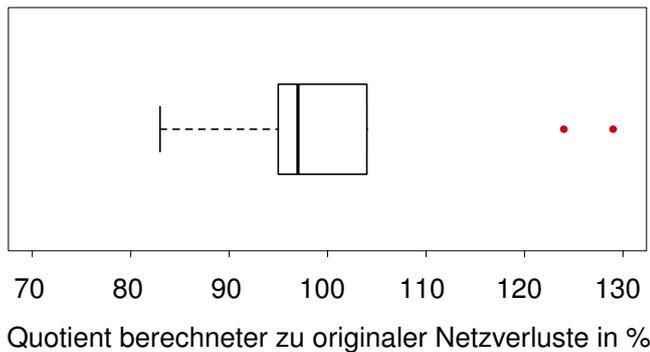


Abbildung 129 Quotient Netzverluste Variante2

Aus dieser Validierung geht hervor, dass der Algorithmus auch für Niedertemperatur- bzw. kalte Nahwärmenetze verwendet werden kann und hier durch den Anpassungsfaktor nach Gleichung 37 sehr gute Ergebnisse generiert. Beide Varianten zeigen, abgesehen von wenigen Ausreißern, eine gute Prognosequalität mit maximal $\pm 5\%$ Abweichung.

Im folgenden Kapitel werden deshalb unterschiedliche Konzepte zur Wärmeversorgung eines Quartiers analysiert und in Bezug auf ökologische und ökonomische Kriterien ausgewertet.

4. Anwendung in der Quartiersentwicklung

In diesem Kapitel werden drei typische städtische Quartiere anhand unterschiedlicher Wärmeversorgungs-konzepte und energetischer Standards untersucht. Zur Untersuchung werden sowohl ökonomische als auch ökologische Kriterien verwendet. Für die ökonomische Untersuchung wird jede Variante einer Wirtschaftlichkeitsberechnung nach VDI Richtlinie 2067 Blatt 1 [111] unterzogen. Zur ökologischen Untersuchung werden die jeweiligen Emissionen der Varianten als CO₂-Äquivalente berechnet.

4.1 Quartiere

Die Quartiere werden stellvertretend für typische Quartiere im städtischen Kontext gewählt. Angesichts der großen Heterogenität der einzelnen Stadtteile fällt die Wahl des Studienortes auf die Landeshauptstadt München.

4.1.1 Auswahlprozess

Hierzu werden im Geoportal München Bebauungspläne im Zeitraum der letzten 15 Jahre gesucht. Hierbei ist das Hauptkriterium für die Auswahl, die Unterschiedlichkeit der Bebauung. Sowohl die Art der Bebauung als auch die Dichte spielen hierbei eine Rolle. Es wird jeweils ein Bebauungsplan mit Reihenhaussiedlung, Gruppenbebauung und mit organischer Zeilenbebauung gewählt. Die Lage dieser gewählten Quartiere kann der Abbildung 130 entnommen werden. Die Bebauungspläne aus dem Geoportal München sind dabei jeweils mit einer Nummer versehen. Nach den zuvor beschriebenen Kriterien sind die Bebauungspläne BP1890 im Stadtbezirk 24 Feldmoching-Hasenberg, BP1971 im Stadtbezirk 13 Bogenhausen und BP1987 im Stadtbezirk 14 Berg am Laim ausgewählt.

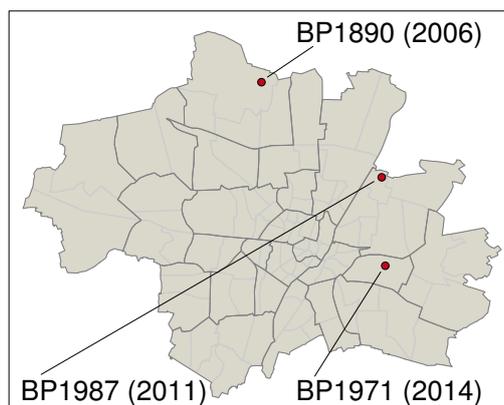


Abbildung 130 Lage der gewählten Bebauungspläne in München (Quelle: In Anlehnung an [112])

4.1.2 Beschreibung

Das Quartier des ersten Baubauungsplans mit der Nr. 1890 liegt nördlich der Paul-Preuß-Straße, südlich der Hochmuttinger Straße und westlich der Bahnlinie München-Regensburg.

Der Plan aus dem Geoportal München [113] stammt aus dem Jahr 2006 und weist die Struktur einer klassischen Reihenhaussiedlung auf. Die Geschossflächen der einzelnen Reihenhäuser reichen von 100 - 130 m². Als weiteres Gebäude befindet sich am südlichen Ende eine Kindertagesstätte mit 500 m² Geschossfläche. Die Summe aller Geschossflächen des Bebauungsplans beträgt 8.799 m².

Die Grundfläche des Quartiers beträgt ohne der Ausgleichsflächen knapp 25.000 m². Wie in Abbildung 131 dargestellt, umfasst der Plan insgesamt 82 Einzelgebäude, welche aus 19 Baukörpern bestehen. In der Legende sind die Geschossflächen der einzelnen Baukörper aufgelistet.

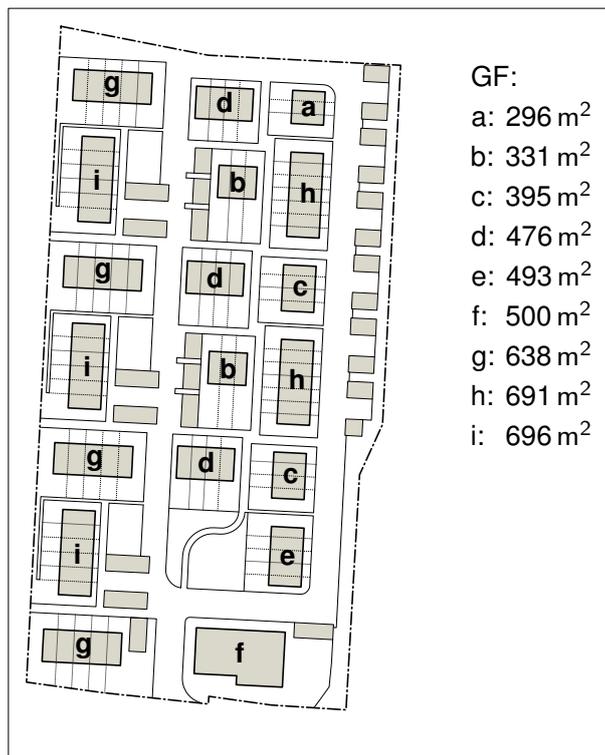


Abbildung 131 Bebauungsplan Nr. 1890 München (Quelle: In Anlehnung an [113])

Der zweite Bebauungsplan Nr. 1971 aus dem Geoportal München [114] beschreibt das Gebiet westlich der Baumkirchner Straße und südlich der Bahnlinie München-Rosenheim. Er ist aus dem Jahr 2014 und beschreibt ein Quartier mit organischer Zeilenbebauung. Die Nutzung reicht von allgemeinen Wohngebieten im nordwestlichen und zentralen Bereich über ein Kerngebiet im nordöstlichen Teil, ein Mischgebiet mit Kindertagesstätte im südöstlichen Bereich und zwei Sondergebiete. An der Baumkirchnerstraße steht das Sondergebiet für den Einzelhandel, wohingegen an der Verbindungsstraße zur Neumarkterstraße ein Sondergebiet mit einer Sportanlage definiert ist. Insgesamt sind im Bebauungsplan 10 Baukörper dargestellt. Die jeweiligen Geschossflächen sind in der Legende in Abbildung 132 mit kleinen Buchstaben den Baukörpern zugeordnet. In Summe ergeben alle Geschossflächen zusammen 85.730 m². Für die weitere Bearbeitung dieses Quartiers werden die Baukörper in Gebäude- teile strukturiert. Hierzu werden die Brandabschnitte aus der Musterbauordnung § 30 [115]

verwendet. Dieser zufolge ist ein Brandabschnitt maximal 40 m lang. In Abbildung 132 ist diese Unterteilung durch gestrichelte Linien gekennzeichnet. Zudem sind die Abschnitte nummeriert. In der Legende erfolgt die Zuordnung der Geschossflächen durch eine Kombination aus Buchstaben und Ziffern. Aus dieser Aufteilung entstehen 31 Gebäudeteile auf einer Grundfläche des Quartiers ohne Ausgleichsflächen von knapp 86.000 m².

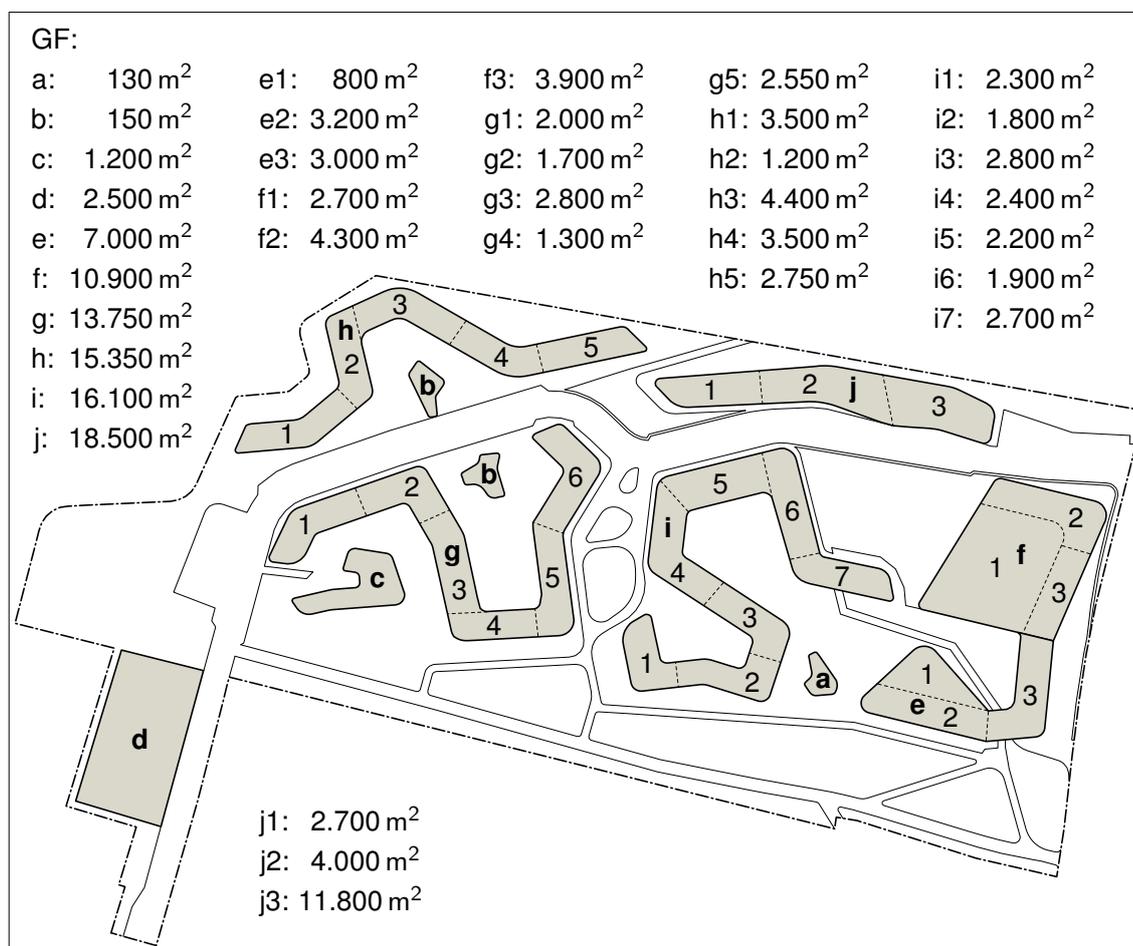


Abbildung 132 Bebauungsplan Nr. 1971 München (Quelle: In Anlehnung an [114])

Auch der dritte Bebauungsplan mit der Nr. 1987 stammt aus dem Geoportal München [116]. Das Quartier liegt zwischen der Oberföhringer Straße im Westen und der Effnerstraße im Osten. Im Norden erfolgt die Abgrenzung durch die Johanneskirchner Straße. Der Bebauungsplan aus dem Jahr 2011 gibt als bauliche Nutzung ein allgemeines Wohngebiet vor. Die Art der Bebauung erfolgt an der Johanneskirchner und der Effner Straße als Randbebauung. Im übrigen Quartier ist eine Gruppenbebauung mit Punkthäusern vorgegeben. So entstehen im Quartier 28 Baukörper, wobei sich durch die Strukturierung der Randbebauung 33 Gebäudeteile ergeben. Die Geschossflächen der jeweiligen Gebäudeteile sind in der Legende in Abbildung 133 aufgeführt. Das Quartier erstreckt sich ohne Berücksichtigung der Ausgleichsflächen über eine Fläche von knapp 57.000 m².

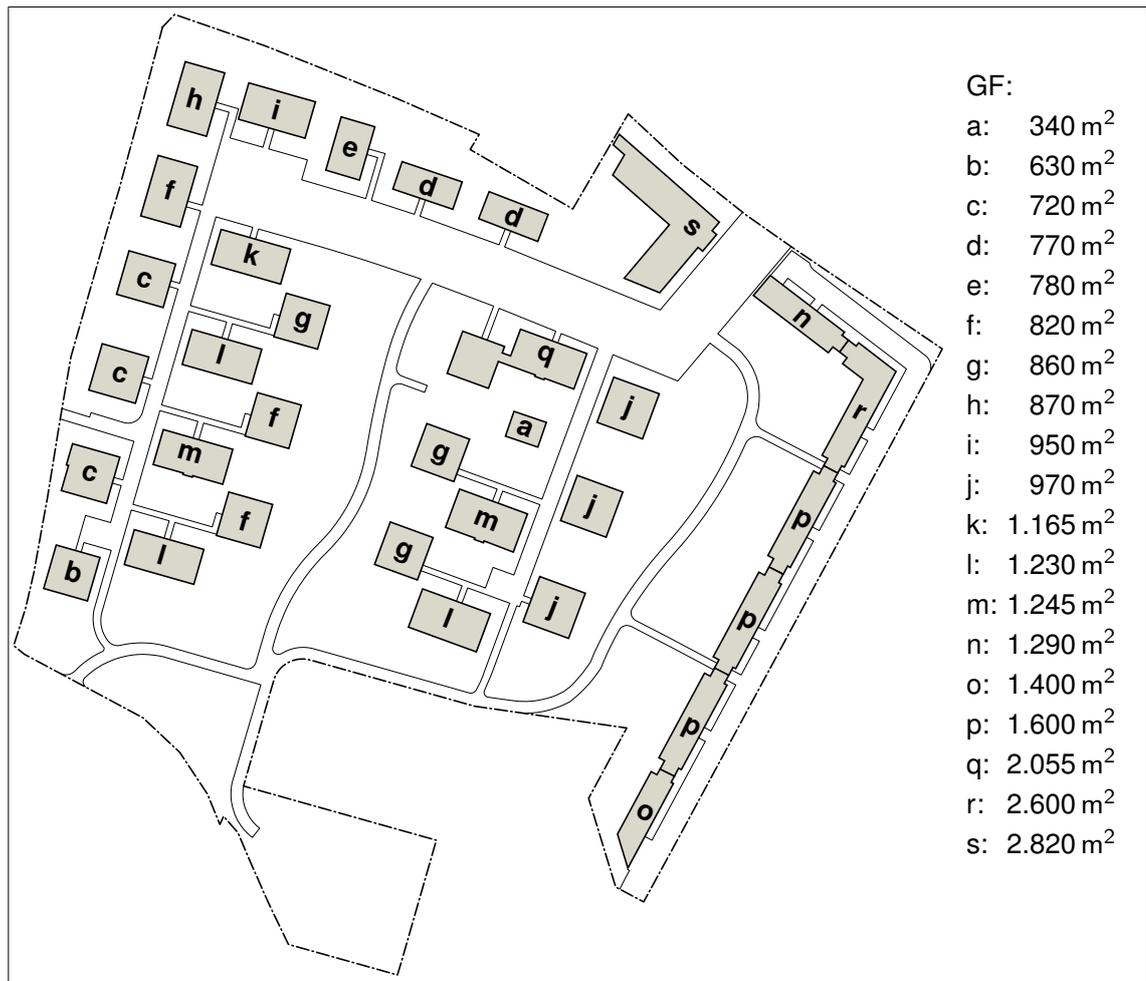


Abbildung 133 Bebauungsplan Nr. 1987 München (Quelle: In Anlehnung an [116])

4.1.3 Energiekennwerte

Die Geschossfläche als Höchstmaß (GF) wird als Basisfläche zur Berechnung des Wärmebedarfs der Gebäude verwendet. Die Wärmebezugswerte der unterschiedlichen Ausführungen entstammen dem Tabula Webtool [46]. Im deutschen Bereich befinden sich unter der Baualtersklasse „2016 ...“ die drei Gebäudearten Einfamilienhaus, Reihenhaushaus und Mehrfamilienhaus. Für jede dieser Gebäudearten gibt es drei „Calculation PDF“-Dokumente mit den jeweiligen Wärmebedarfsberechnungen der Qualitäten EnEV, KfW55 und Passivhaus. Die aus diesen Dokumenten entnommenen Brutto-Nutzenergiekennwerte sind in Tabelle 34 aufgeführt. Die Werte aus dem Tabula Webtool sind durch Division mit dem Faktor 0,8 auf die GF aus den Bebauungsplänen als Bezugsfläche angepasst (vgl. Abschnitt 2.1.2). Das Maschinenhaus der „Alten Ziegelei Oberföhring“ in Bebauungsplan 1987 wird ebenso wie die Gebäude der Kindertagesstätten mit den Wärmebedarfswerten der MFH aus Tabelle 34 versehen. Diese Vorgehensweise deckt sich mit den Daten aus vergleichbaren Projekten der Gebäudedatenbank des österreichischen klimaaktiv Programms^{1,2}.

¹ <https://klimaaktiv-gebaut.at/kindergarten-bad-eisenkappelzeleznik-kapla.htm> (aufgerufen am 24.11.2020)

² <https://klimaaktiv-gebaut.at/tagesbetreuung-langenzersdorf.htm> (aufgerufen am 24.11.2020)

Tabelle 34 Wärmebedarfskennwerte in kWh/m²a (GF) Wohngebäude (Quelle: Daten aus [46])

Gebäudeart	EnEV	KfW55	Passivhaus
EFH	68,3	34,9	21,5
RH	59,8	26,9	17,4
MFH	51,0	25,9	18,2

Für die übrigen Gebäudearten gelten die Werte aus Tabelle 35. Hier entspricht die erste Spalte ungefähr den Anforderungen der EnEV2016. In der zweiten Spalte werden die Werte der ersten Spalte mit 70 % multipliziert (in etwa vergleichbar mit KfW55). Die letzte Spalte entspricht dem Passivhausniveau. Der EnEV Wert für Bürogebäude stammt aus der dena-Studie: Büroimmobilien von Henger et al. [117, S. 17]. Der hierin angegebene Wert 110 kWh/m²a wird mit dem Faktor 0,87 nach Bogenstätter [118, S. 5] multipliziert, um ihn auf die GF zu beziehen. Weil sich Henger et al. noch auf die EnEV2009 beziehen, passt die Multiplikation mit 0,75 den resultierenden Wert auf das verschärfte Niveau der EnEV2016 an. Für den Wert des Passivhausniveaus wird der Mittelwert aus zwei Projektbeispielen der Gebäudedatenbank des österreichischen klimaaktiv-Programms verwendet^{3,4}. Auch hier erfolgt die Bezugsflächenanpassung mit dem Faktor 0,87 nach Bogenstätter [118, S. 5]. Für die Kindertagesstätten wird der EnEV Wert aus den Energiekennzahlen des Gebäudemangements der Stadt Aachen bezogen⁵. Dieser beträgt im Jahr 2007, auf die BGF bezogen, 137 kWh/m²a. Die Anpassung auf das verschärfte Niveau der EnEV2016 erfolgt durch Multiplikation mit den beiden Faktoren 0,7 und 0,75. Dieser EnEV Wert wird für die zweite Spalte nochmals mit 0,7 multipliziert. Der Wert für die Spalte Passivhaus stammt von Kislinger et al. [119, S. 106].

Im Lebensmittelhandel stammt der Wärmebedarf (EnEV) von Karopka et al. [120, S. 22]. Es wird der Wert 135 kWh/m²a für Handel Food über 300 m² gewählt. Dieser wird mit dem Faktor 0,87 nach Bogenstätter [118, S. 8] flächenbereinigt und mit dem Faktor 0,75 auf das Niveau 2016 gebracht. Die mittlere Spalte ergibt sich durch Multiplikation mit 70 %. Der Passivhauswert mittelt sich aus dem Wert des ReweMarktes „zero:e park“ in Hannover nach der Pressemitteilung des Passivhausinstituts⁶ und dem Wert des MPREIS Marktes in Ischgl aus der Gebäudedatenbank des österreichischen klimaaktiv Programms⁷.

Für die Sporthalle in Bebauungsplan 1971 wird der Wert des Wärmebedarf (EnEV) aus Karopka et al. [120, S. 20] entnommen. Dieser wird mit dem Faktor 0,91 als Mittelwert der bei-

³ <https://klimaaktiv-gebaut.at/energybase.htm> (aufgerufen am 24.11.2020)

⁴ <https://klimaaktiv-gebaut.at/wirtschaftszentrum-noe-wzn.htm> (aufgerufen am 24.11.2020)

⁵ http://www.aachen.de/DE/stadt_buerger/umwelt/pdf/Energiekennzahlen_Kitas.pdf (aufgerufen am 27.11.2020)

⁶ http://www.ig-passivhaus.de/upload/2014_02_24_Passivhaus-Supermarkt_Pressemitteilung.pdf (aufgerufen am 24.11.2020)

⁷ <https://klimaaktiv-gebaut.at/mpreis-ischgl.htm> (aufgerufen am 24.11.2020)

den Projekte aus dem Vortrag von Lütkemeyer⁸ flächenbereinigt und mit dem Faktor 0,75 auf das Niveau 2016 gebracht. Die Anpassung in der zweiten Spalte erfolgt mit dem Faktor 0,7. Der Wert in der letzten Spalte ergibt sich auf Basis des Projektes Sporthalle Lieferung aus dem österreichischen klimaaktiv Programm⁹. Hierzu werden für die Umrechnung von Brutto-rauminhalt auf Bruttogrundfläche die Werte aus den beiden Projekten nach Lütkemeyer verwendet.

Tabelle 35 Wärmebedarfskennwerte in kWh/m²a (GF) Nichtwohngebäude

Gebäudeart	EnEV	KfW55	Passivhaus
Bürogebäude	71,8	50,3	11,8
Kindertagesstätte	71,9	50,3	15,2
Lebensmittelhandel	88,1	61,7	13,7
Sporthalle	116,0	81,2	11,5

Die Vollbenutzungsstunden der Gebäudearten RH, MFH, Wohnblock (WB), HH, Kiga und Büro in Tabelle 36 stammen aus dem Programm Sophena des Netzwerks C.A.R.M.E.N. e.V. [121]. Für Berechnung der Vollbenutzungsstunden des Handels wurden die Wärmebedarfswerte und Heizleistung aus dem Endbericht des Fraunhofer Instituts für solare Energiesysteme zum Projekt: „ALDI 2010 - hocheffizienter Supermarkt mit geothermiegestütztem Kälteverbund“ entnommen [122].

Tabelle 36 Vollbenutzungsstunden in h/a für unterschiedliche Gebäudearten (Quelle: Daten aus [121][122])

Gebäudeart	EnEV	KfW55	Passivhaus
RH	1.550	1.009	710
MFH	1.279	1.223	619
WB	2.163	1.787	1.415
HH	1.883	1.449	879
Kiga	1.500	1.500	1.500
Büro	1.700	1.700	1.700
Handel	1.356	1.146	936

⁸ https://energiekonsens.de/media/05_Vortraege/2016/Vortrag_Luetkemeyer_Sporthallen_Klimaakademie_2016_1.0.pdf (aufgerufen am 27.11.2020)

⁹ <https://klimaaktiv-gebaut.at/sporthalle-liefering.htm> (aufgerufen am 26.11.2020)

4.2 Wärmeversorgungskonzepte

4.2.1 Zentrales Biomethan BHKW 90/60

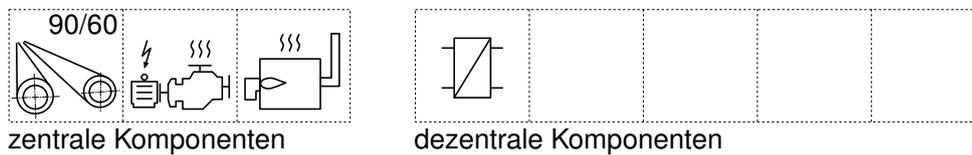


Abbildung 134 Übersicht Konzept Biomethan BHKW Wärmenetz 90/60

Konzept

Die Wärmeversorgung erfolgt in der in Abbildung 134 dargestellten Variante über ein Nahwärmenetz mit 90 °C Vorlauftemperatur und 60 °C Rücklauftemperatur. Dieses Wärmenetz wird in der Grundlast durch ein Biomethan Blockheizkraftwerk (BHKW) versorgt. In Anlehnung an das Beispiel aus dem Planungseleitfaden „BHKW-Grundlagen“ der Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE) [123, S. 27], wird das BHKW auf 6.100 Volllaststunden im Jahr ausgelegt. Zur Spitzenlastdeckung wird ein Gaskessel verwendet, der ebenfalls mit Biomethan betrieben wird.

Anlagentechnik

Für das Wärmenetz werden Kosten und Wärmeverluste aus der Simulationsrechnung nach Abschnitt 4.3 ermittelt. Dieser liegen die Daten aus Abschnitt 2.1.7 zugrunde.

Der Wirkungsgrad des BHKWs wird mit den Daten aus dem Bericht „BHKW-Kenndaten 2011, Module, Anbieter, Kosten“ von ASUE [124] ermittelt. Dieser berechnet sich aus dem Median von 306 aufgeführten Erdgas BHKW im elektrischen Leistungsbereich von 15 kW bis 18.320 kW zu 87,7 %. Der Wirkungsgrad 94 % des Biomethankessels ergibt sich aus den Daten der Berechnungsblätter des Tabula Webtools [46] (vgl. Abschnitt 4.1.3).

Die Berechnung der Investitionskosten des BHKWs erfolgt nach den beiden Ausgleichsfunktionen aus „BHKW-Kenndaten 2001“ von ASUE [124, S. 12]. Die Anpassung der Preise aus dem Jahr 2011 auf das Preisniveau 2019 erfolgt über die Werte der Lfd-Nr. 573 aus dem Index der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte des statistischen Bundesamtes [125]. Die Investitionskosten des Biomethan Spitzenlastkessels berechnen sich aus der Kostenkurve des Preisatlas des Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. [126, S. 250]. Diese werden über die Werte der Lfd-Nr. 320 aus dem Index der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte des statistischen Bundesamtes [125] auf das Preisniveau 2019 angepasst. Jeder Gebäudeanschluss wird mit einer indirekten Fernwärmestation ausgerüstet. Für die Investitions-

kostenberechnung wird durch Regression die Kostenkurve in Abbildung 135 gebildet. Als Datenbasis dient die Preisliste 2019/2020/2021 der Firma LME¹⁰.

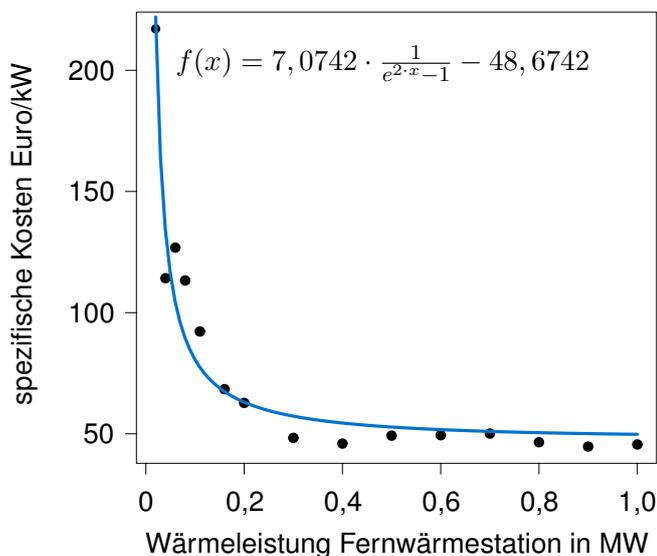


Abbildung 135 Preisurve indirekte Fernwärmestation

Energieträger

Als Energieträger wird in dieser Variante auf Erdgasqualität aufbereitetes Biogas verwendet. Die hierbei auftretende Umweltbelastung in Form von CO₂-Äquivalenten basiert auf den Ergebnissen der ProBas Datenbank des Umweltbundesamtes. Hier wird unter den Prozessdetails „PipelineBiomethan-2Kultur-DE-2020“ [127] der Wert für CO₂-Äquivalente inklusive Vorkette mit 19.674 kg/TJ aufgeführt. Dies entspricht 71 g/kWh. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung basiert der Energieträgerpreis mit 7,00 ct/kWh für Biomethan auf der dena-Analyse: „Branchenbarometer Biomethan 2020“ von Völler [128].

Der erzeugte elektrische Strom wird in das öffentliche Stromnetz eingespeist. Zur Verechnung dieser Strommenge wird ebenfalls der Wert für die CO₂-Äquivalente inklusive Vorkette aus der ProBas Datenbank entnommen. Unter den Prozessdetails „Netz-el-DE-lokal-HH/KV-2020“ [129] findet sich hierzu der Wert 113.068 kg/TJ, der umgerechnet 407 g/kWh ergibt. Die Vergütung erfolgt durch eine Förderung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2017) [130]. Hierin ist die Vergabe der Förderung über ein Ausschreibungsverfahren vorgesehen. Die Höhe der Einspeisevergütung richtet sich nach dem günstigsten Angebot. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird deshalb der gewichtete Mittelwert (14,85 ct/kWh) der Zuschlagswerte vom 01.11.2020 aus den Statistiken zum Ausschreibungsverfahren zur Ermittlung der finanziellen Förderung von Biomasse-Anlagen nach dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) der Bundesnetzagentur [131] verwendet.

¹⁰<http://www.lme.co.at/wp-content/uploads/2019/05/LME-Bruttopreisliste-2019-2020-2021.pdf> (aufgerufen am 06.12.2020)

4.2.2 Zentrale Sole/Wasser Wärmepumpe 60/30

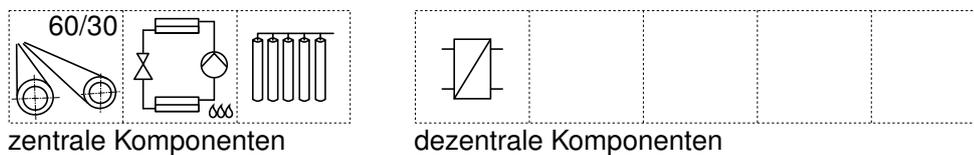


Abbildung 136 Übersicht Konzept Solewärmepumpe Wärmnetz 60/30

Konzept

Die Wärmeversorgung erfolgt in dieser Variante, wie in Abbildung 136 dargestellt, über ein Nahwärmenetz mit 60 °C Vorlauftemperatur und 30 °C Rücklauftemperatur. Dieses Wärmenetz wird durch eine mit einem Erdsondenfeld verbundene Sole-Wasser-Wärmepumpe versorgt.

Anlagentechnik

Für das Wärmenetz werden Kosten und Wärmeverluste aus der Simulationsrechnung nach Abschnitt 4.3 ermittelt. Dieser liegen die Daten aus Abschnitt 2.1.7 zugrunde.

Die Jahresarbeitszahl der zentralen Sole-Wasser-Wärmepumpe ergibt sich als gewichteter Mittelwert der Wärmepumpen-Feldtestergebnisse aus der Studie: Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes - Bestandsaufnahme und Trends [132, S. 53] des GeothermieZentrum Bochum aus dem Jahr 2010. Die Bemessung der Länge der Erwärmesonden erfolgt mit dem Kennwert 50 Watt je Sondenmeter gemäß dem Leitfaden Erdwärme [133, S. 18] des Bundesverbands Wärmepumpe (BWP) e.V..

Die Preise der Sole-Wasser-Wärmepumpe im unteren Leistungsbereich von 5,6 bis 17,2 kW stammen aus dem Energie-Experten-Portal¹¹. Für den oberen Leistungsbereich von 100 bis 900 kW werden die Werte aus der Studie: „Industrielle Großwärmepumpen - Potenziale, Hemmnisse und Best-Practice-Beispiele“ [134, S. 25] verwendet. Letztere sind aus dem Jahr 2008 und werden mit der Lfd-Nr. 506 aus den Daten des statistischen Bundesamtes [125] auf das Jahr 2019 preisbereinigt. Durch Regressionsrechnung ergibt sich der Zusammenhang in Abbildung 137. Der längenbezogene Preis für die Erdwärmesonden beträgt nach dem Kundenratgeber Erdwärme vom Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. [133, S. 24] 60 Euro/m. Jeder Gebäudeanschluss wird mit einer indirekten Fernwärmestation ausgerüstet. Für die Investitionskostenberechnung wird die Kostenkurve in Abbildung 135 verwendet.

¹¹https://www.energie-experten.org/heizung/waermepumpe/erdwaermepumpe#_c30005 (aufgerufen am 30.12.2020)

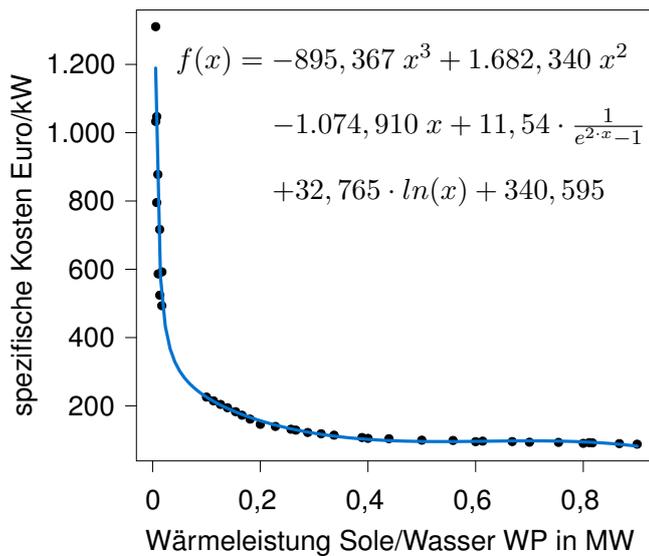


Abbildung 137 Preiskurve Sole/Wasser Wärmepumpe

Energieträger

Die zentrale Sole-Wasser-Wärmepumpe wird mit elektrischem Strom aus dem öffentlichen Stromnetz betrieben. Zur Ermittlung der CO₂-Äquivalente inklusive Vorkette werden die Werte aus der ProBas Datenbank verwendet. Unter den Prozessdetails: Netz-el-DE-lokal-HH/KV-2020 [129] findet sich hierzu der Wert 113.068 kg/TJ, der umgerechnet 407 g/kWh ergibt. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird für die Höhe des Strompreises aus einer bundesweiten Verbraucherbefragung der Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz e.V. [135, S. 27 f.] der Wert 16,35 ct/kWh (ohne USt.) verwendet. Für den Stromverbrauch der Netzpumpen werden die Preise aus der Veröffentlichung des statistischen Bundesamtes [136] mit 26,92 ct/kWh ohne USt. verwendet.

4.2.3 Niedrigtemperaturnetz nach Heissler et al.

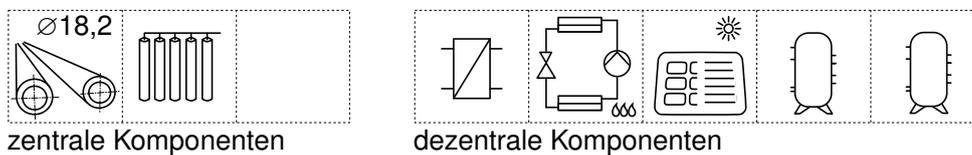


Abbildung 138 Übersicht Konzept Niedrigtemperaturnetz 18,2

Konzept

Für die Wärmeversorgung in dieser Variante wird das System des Referenzszenarios aus der Studie von Heissler et al.: „Potenziale von Niedrigtemperaturnetzen zur Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien in Quartieren“ [2] auf die in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen Quartiere übertragen. In Abbildung 138 sind die dazu erforderlichen Komponenten darge-

stellt. Die Wärmeerzeugung erfolgt dezentral über PVT-Solarkollektoren und Wärmepumpen. Die Überschusswärme wird mittels saisonalen Erdsondenspeichers nutzbar gemacht. Der Überschussstrom aus den PVT-Solarkollektoren wird in das öffentliche Stromnetz übertragen. In den einzelnen Gebäuden sorgen, wie in der Studie [2, S. 18 f.] beschrieben, Puffer- und Bereitschaftsspeicher für eine Glättung der auftretenden Lastspitzen. Das Wärmenetz verbindet die Gebäude untereinander, dient hauptsächlich als Anbindung der Gebäude an den saisonalen Erdsondenspeicher und wird, wie von Heissler et al. [2, S. 40] beschrieben, im Durchschnitt mit 18,2 °C Netztemperatur betrieben.

Anlagentechnik

Für das Wärmenetz werden Kosten und Wärmeverluste aus der Simulationsrechnung nach Abschnitt 4.3 ermittelt. Dieser liegen die Daten aus Abschnitt 2.1.7 zugrunde. Die Dimensionierung erfolgt in rfWärme auf Basis der bezogenen Wärmemenge und einer Temperaturspreizung von 30 K.

Die zweite zentrale Komponente ist der saisonale Erdsondenspeicher. In der Studie [2, S. 31] werden für das Referenzszenario (EnEV), wie auch für das Szenario 1 (Passivhaus), zwei Erdsondenfelder mit je 64 x 110 m Länge [2, S. 28] verwendet. Bei einer Gesamtnutzfläche der Gebäude von 53.718 m² errechnet sich hieraus eine spezifische Erdsondenlänge von 0,2621 m je m² Nutzfläche. Mit diesem Kennwert werden die Größen der Erdsonden in den zu untersuchenden Quartieren aus Abschnitt 4.1.2 bestimmt. Auch hier wird der längenbezogene Preis 60 Euro/m nach Sabel [133, S. 24] für die Erdwärmesonden verwendet.

Jeder Gebäudeanschluss wird mit einer indirekten Fernwärmestation ausgerüstet. Für die Investitionskostenberechnung wird die Kostenkurve in Abbildung 135 verwendet. Ebenso ist jeder Gebäudeteil mit einer dezentralen Wärmepumpe ausgerüstet. Diese bezieht ihre Eingangswärme aus dem Pufferspeicher. Die Dimensionierung erfolgt auf Basis der jeweiligen Gebäudeheizlast. Mit Hilfe dieser können über die Funktion aus Abbildung 137 die Kosten berechnen werden.

Der in der Wirtschaftlichkeitsanalyse verwendete spezifische Preis 920 €/m² für den PVT-Kollektor basiert auf den Daten von Leibfried, Wagner und Abdul-Zahra [137] und deckt sich mit einer eigenen Kostenerhebung. Für die Flächenauslegung der PVT-Kollektoren werden aus den Parametern nach Heissler et al. [2, S. 32 f.] spezifische, auf die Nutzfläche bezogene, Kennwerte gebildet. Diese betragen für die Gebäude mit EnEV bzw. KfW55 Standard 0,06162 (3.310 m²/53.718 m²) und für den Passivhausstandard 0,04777 (2.566 m²/53.718 m²).

Bei der Bestimmung der Speichergrößen wird die zuvor ermittelte PVT-Kollektorfläche als Basis verwendet. Nach Heissler et al. [2, S. 32 f.] berechnet sich das Volumen des Pufferspeichers im EnEV und KfW55 Standard zu 118 l/m² (391 m³/3.310 m²), im Passivhaus zu 99 l/m² (254 m³/2.566 m²) und das Volumen des Bereitschaftsspeichers im EnEV und KfW55

Standard zu 59 l/m² (196 m³/3.310 m²), im Passivhaus zu 50 l/m² (128 m³/2.566 m²). Die Investitionskosten der unterschiedlichen Wärmespeicher berechnen sich aus der Kostenkurve des Preisatlas des Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. [126, S. 351]. Diese werden über die Werte der Lfd-Nr. 319 aus dem Index der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte des statistischen Bundesamtes [125] auf das Preisniveau 2019 angepasst.

Energieträger

Die dezentralen Wärmepumpen werden mit elektrischem Strom aus dem öffentlichen Stromnetz betrieben. Zur Ermittlung der CO₂-Äquivalente inklusive Vorkette werden die Werte aus der ProBas Datenbank verwendet. Unter den Prozessdetails: Netz-el-DE-lokal-HH/KV-2020 [129] findet sich hierzu der Wert 113.068 kg/TJ, der umgerechnet 407 g/kWh ergibt. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird für die Höhe des Strompreises aus einer bundesweiten Verbraucherbefragung der Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz e.V. [135, S. 27 f.] der Wert 16,35 ct/kWh (ohne USt.) verwendet. Die aus dem Netz bezogene Strommenge wird aus den Daten der Studie nach Heissler et al. [2, S. 41, 45] berechnet. Für den EnEV und KfW55 Standard werden 17% (367,5 MWh/a / 2.166 MWh/a) des Wärmebedarfs aus dem Stromnetz bezogen, im Passivhausstandard sind es 16% (275,8 MWh/a / 1.703 MWh/a).

Bei der Berechnung der in das Stromnetz eingespeisten Überschussstrommenge wird analog vorgegangen. Im EnEV und KfW55 Standard werden 11,1% (240,7 MWh/a / 2.166 MWh/a) des Wärmebedarfs an das Stromnetz abgegeben, im Passivhausstandard sind es 10,8% (183,6 MWh/a / 1.703 MWh/a). Die Vergütung des in das öffentliche Stromnetz eingespeisten Überschussstroms erfolgt als Einspeisevergütung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz § 48 (EEG 2017) [130]. Für den Stromverbrauch der Netzpumpen werden die Preise aus der Veröffentlichung des statistischen Bundesamtes [136] mit 26,92 ct/kWh ohne USt. verwendet.

4.2.4 Luft-Wasser-Wärmepumpen dezentral

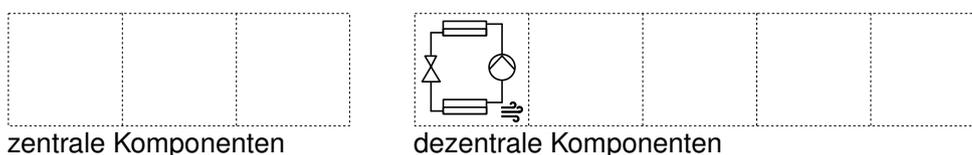


Abbildung 139 Übersicht Konzept Luft-Wasser-Wärmepumpen

Konzept

Die Wärmeversorgung in dieser Variante erfolgt über eine dezentrale Luft-Wasser-Wärmepumpe in jedem Gebäudeteil.

Anlagentechnik

Die Dimensionierung der Wärmepumpen ergibt sich aus der Gebäudelast der einzelnen Gebäudeteile. Für die Kalkulation der Investitionskosten, basierend auf der Preisliste¹², wird durch Regression eine Kostenkurve gebildet. Zuvor werden die Preise aus dem Jahr 2011 mit der Lfd-Nr. 506 aus den Daten des statistischen Bundesamtes [125] auf das Niveau von 2019 gebracht.

Die Regressionskurve mit zugehöriger Funktion ist der Abbildung 140 zu entnehmen.

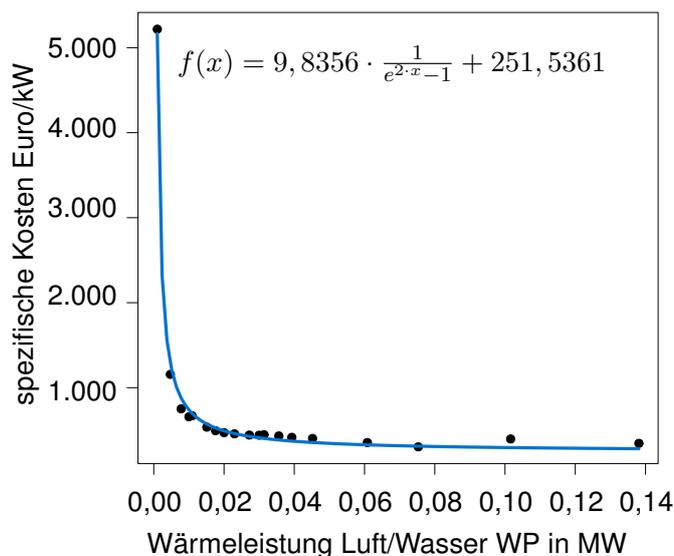


Abbildung 140 Preiskurve Luft-Wasser-Wärmepumpe

Energieträger

Für die Berechnung der Wärmepumpenstromaufnahme wird die Jahresarbeitszahl 2,71 verwendet. Dies ergibt sich als gewichteter Mittelwert der Wärmepumpen-Feldtestergebnisse aus der Studie: „Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes - Bestandsaufnahme und Trends“ [132, S. 53] des Geothermie Zentrums Bochum aus dem Jahr 2010.

Zur Ermittlung der CO₂-Äquivalente inklusive Vorkette werden die Werte aus der ProBas Datenbank verwendet. Unter den Prozessdetails: Netz-el-DE-lokal-HH/KV-2020 [129] findet sich hierzu der Wert 113.068 kg/TJ, der umgerechnet 407 g/kWh ergibt.

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird für die Höhe des Strompreises aus einer bundesweiten Verbraucherbefragung der Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz e.V. [135, S. 27 f.] der Wert 16,35 ct/kWh (ohne USt.) verwendet.

¹²http://www.kkt-cool.de/wp-content/uploads/2012/09/KKT_Galletti_Preisliste11-2012.pdf (aufgerufen am 02.01.2021)

4.2.5 Fernwärme Stadtwerke München

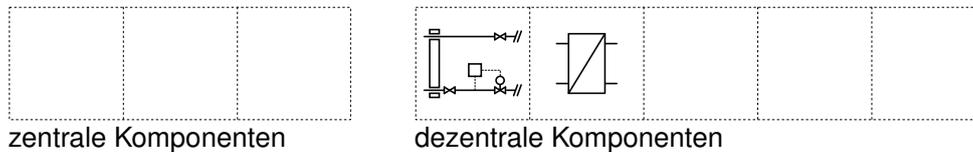


Abbildung 141 Übersicht Konzept Fernwärme Stadtwerke München

Konzept

In dieser Variante wird das Gebiet mit Fernwärme der Stadtwerke München versorgt. Die Versorgung erfolgt objektbezogen. Das Wärmenetz bleibt außer Betracht, da sich Preise und Emissionen auf das gesamte städtische Versorgungsgebiet beziehen.

Anlagentechnik

In den einzelnen Gebäuden sind Wärmeübergabestationen nach der Übergabestelle der Stadtwerke München zu errichten. Die Investitionskosten ergeben sich aus der Kostenkurve in Abbildung 135.

Für die Errichtung eines Anschlusses an das Fernwärmenetz der Stadtwerke München entstehen gemäß dem Preisblatt für Netzanschlüsse (gültig ab 1. Juli 2020) [138] Kosten für den leistungsbezogenen Baukostenzuschuss und die Netzanschlusspauschale. Diese Werte werden in der Wirtschaftlichkeitsberechnung verwendet.

Energieträger

Die bezogene Wärme aus dem Wärmeverbundnetz München weist gemäß den Angaben der Stadtwerke München [139] eine Treibhausgasemission von 66g/kWh CO₂-Äquivalenten auf.

Der Energiepreis berechnet sich nach den „ergänzenden Bedingungen der SWM Versorgungs GmbH (SWM) für die Versorgung mit Fernwärme im Versorgungsgebiet München Stadt, Martinsried, Unterföhring“ [140] aus dem Arbeits- und dem Leistungspreis.

4.2.6 Wärmenetzvarianten

In einem Quartier gibt es unterschiedliche Möglichkeiten des Trassenverlaufs. Um diesem Umstand gerecht zu werden, werden für jeden Bebauungsplan drei Trassenverlaufvarianten untersucht.

Bebauungsplan 1890

Das Quartier ist geprägt durch eine Reihenhausbebauung mit zwei von Nord nach Süd verlaufenden Erschließungsstraßen, Paul-Preuß-Straße und Paul-Huml-Weg. Dazwischen verläuft parallel ein Weg. In Abbildung 142 sind die Variante der Trassenverläufe dargestellt. Die erste Trassenvariante versorgt die Gebäude über die beiden Erschließungsstraßen mit einer Trassenlänge von 1.108 trm.

Die zweite Trassenvariante verwendet hierzu den Weg in der Mitte des Quartiers. Dadurch reduziert sich die Länge der von Nord nach Süd verlaufenden Leitungsabschnitte, jedoch erhöhen sich gleichzeitig die Leitungslängen in Ost-Westrichtung. Insgesamt ist die Trasse in Variante 2 mit 1.011 trm nur geringfügig kürzer als in Variante 1.

Die Variante 3 stellt eine Vereinfachung der Variante 2 dar. Hier wird die Grundstruktur von Variante 2 übernommen, jedoch werden nicht mehr alle Gebäudeeinheiten, sondern nur noch die einzelnen Baukörper angeschlossen. Die weitere Wärmeverteilung erfolgt innerhalb der Gebäude. Ein solches Vorgehen ist denkbar, wenn die Reihenhäuser keiner Realteilung unterliegen, sondern in einer Eigentümergemeinschaft betrieben werden oder sich im Eigentum einer Wohnbaugesellschaft befinden. In Variante 3 kann die Trassenlänge mit dieser Maßnahme mit 540 trm nahezu halbiert werden. Der fiktive Anschlusspunkt befindet sich für alle Varianten an der südlichen Zufahrt.

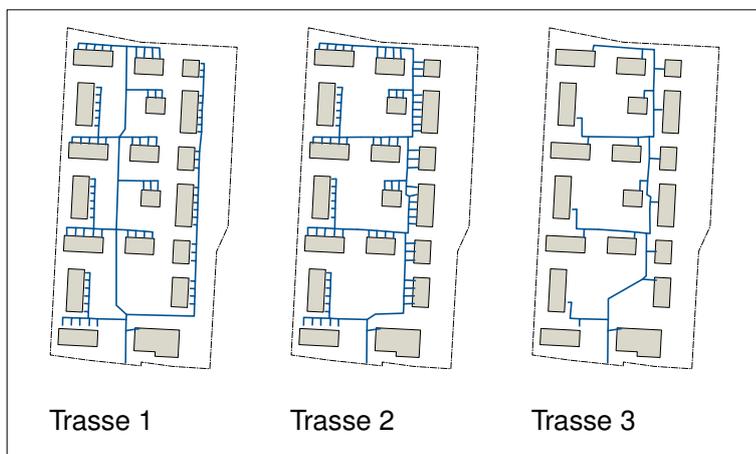


Abbildung 142 Trassenverlaufsvarianten BP1890

Tabelle 37 Wärmeabnahmedichten im Quartier BP1890

Bezug	Variante	Einheit	EnEV	KfW55	Passivhaus
Trassenlänge	1	kWh/(trm·a)	523	236	153
Trassenlänge	2	kWh/(trm·a)	574	259	168
Trassenlänge	3	kWh/(trm·a)	1.074	485	315
Quartierfläche	1-3	MWh/(ha·a)	238	107	70

Vergleicht man die Abnahmedichten in Tabelle 37 mit dem Kennwert der ST4 aus dem Leitfa- den Energienutzungsplan (Abbildung 3) wird deutlich, dass die Wärmeabnahmedichte EnEV aufgrund gesteigerter Anforderungen an die energetische Gebäudequalität nur mehr die Häl- fe des Kennwerts erreicht. Im Falle der Passivhausqualität sind es hier nur noch 16 %.

Bebauungsplan 1971

Dieses Quartier ist geprägt durch eine große Heterogenität der Nutzung. Diese findet sich in einer mit organischer Zeilenbebauung wieder, welche sich von Ost nach West schlängelt. In dieser Richtung verläuft auch die Hupterschließungsstraße. Parallel dazu verläuft etwas südlicher ein Geh- und Radweg. In Abbildung 143 sind die Varianten der Trassenverläufe dar- gestellt. Der erste Trassenverlauf orientiert sich an der Hupterschließungsstraße und führt von dort zu den einzelnen Gebäudeteilen. Die südöstlich gelegenen Gebäudeteile bedür- fen hierzu einer etwas längeren Stichleitung, welche am östlichen Rand nach Süden geführt wird. Der fiktive Anschlusspunkt befindet sich an der nordöstlichen Zufahrt. Die Trassenlänge dieser Variante beträgt 1.536 trm.

Die zweite Trassenvariante erschließt die südlichen Gebäudeteile über einen eigenen Strang, der in dem zuvor beschriebenen Geh- und Radweg verläuft. Hierdurch erhöht sich die Tras- senlänge auf 1.647 trm. Der fiktive Anschlusspunkt befindet sich in dieser Variante an der südlichen Zufahrt im Bereich der Sporthalle.

In der dritten Trassenvariante wird der fiktive südliche Einspeisepunkt beibehalten, jedoch er- folgt der Trassenverlauf wieder entlang der Hupterschließungsstraße. Zudem werden nicht mehr alle Gebäudeteile angefahren, sondern lediglich die einzelnen Baukörper. Deshalb be- trägt in dieser Variante die Trassenlänge nur mehr 930 trm.

Tabelle 38 Wärmeabnahmedichten im Quartier BP1971

Bezug	Variante	Einheit	EnEV	KfW55	Passivhaus
Trassenlänge	1	kWh/(trm·a)	3.592	2.225	882
Trassenlänge	2	kWh/(trm·a)	3.350	2.075	823
Trassenlänge	3	kWh/(trm·a)	5.933	3.674	1.457
Quartierfläche	1-3	MWh/(ha·a)	762	472	187

Wegen der Heterogenität kann diesem Quartier nicht ohne Weiteres einer der Siedlungstypen nach Blesl [14] zugeordnet werden. Es ergibt sich ein Mischung aus ST6 (Zeilenbebauung mit großen Mehrfamilienhäusern oder Hochhäusern) mit der Wärmedichte 1.013 MWh/(ha·a) aus Abbildung 3 und der ST11b (Gewerbliche Sonderbauten / Dienstleistungsbauten) mit 1.253 MWh/(ha·a) aus Abbildung 4. Ein Vergleich mit den Werten aus Tabelle 38 zeigt die deutliche Verbesserung der energetischen Gebäudequalität in diesen Varianten.

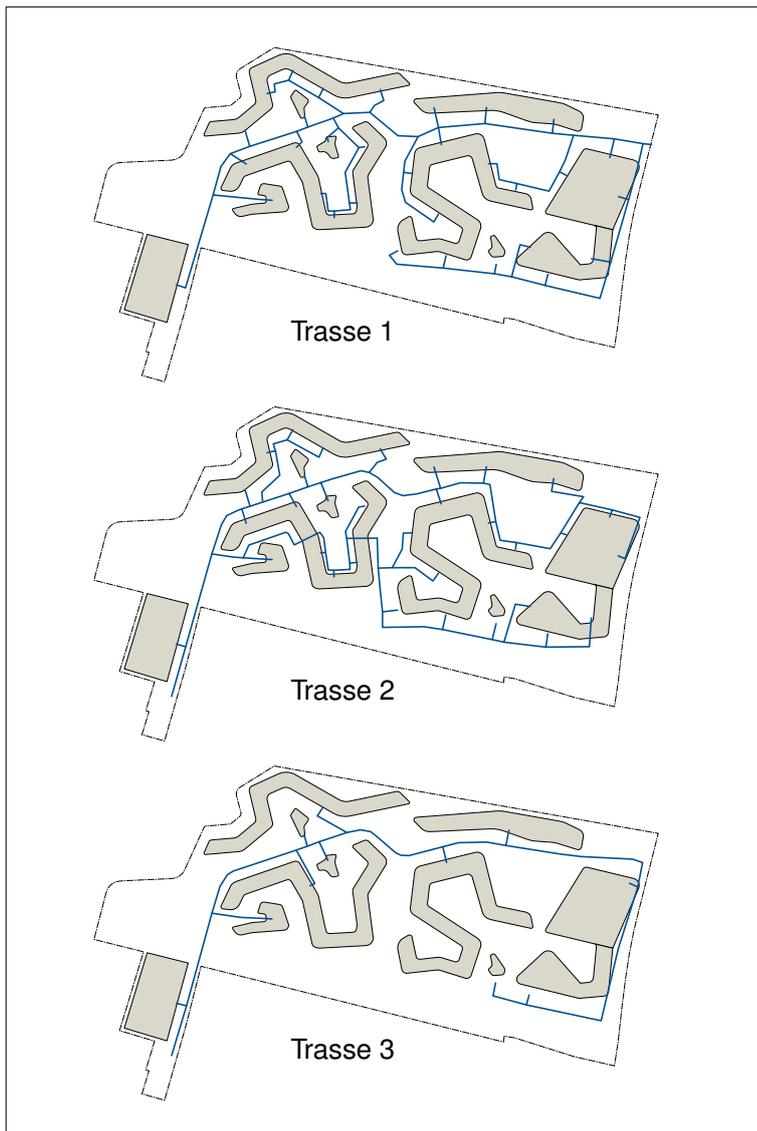


Abbildung 143 Trassenverlaufsvarianten BP1971

Bebauungsplan 1987

Das Quartier ist überwiegend geprägt durch eine Bebauung mit Mehrfamilienwohngebäuden. Diese sind im Osten als Randbebauung, im restlichen Quartier als Punkthäuser ausgeführt. Im Norden verläuft die Else-Lasker-Schüler-Straße als Haupteerschließungsstraße mit den Parkplätzen von Ost nach West. Von dieser führen jeweils zwei kleinere Erschließungsstraßen (Marie-Luise-Kaschnitz-Straße, Carry-Brachvogel-Straße) in südliche Richtung. Dazwischen verbinden Geh- und Radwege die Gebäude. Der erste Trassenverlauf verläuft entlang der Erschließungsstraßen. Der fiktive Anschlusspunkt befindet sich an der nordöstlichen Zufahrt. Die Trassenlänge dieser Variante beträgt 1.417 trm.

Für die Varianten 2 und 3 erfolgt die Versorgung über die östlich gelegene Marie-Luise-Kaschnitz-Straße mit einem fiktiven Anschluss an der östlichen Verbindung zum benachbarten Quartier. Die Trassen dieser beiden Varianten verlaufen in zwei Strängen. Der ers-

te Strang versorgt über die Marie-Luise-Kaschnitz-Straße die nordöstlichen Gebäude. Eine weiterer Strang verläuft nun über die Geh- und Radweg im Inneren des Quartiers. Für die Variante 2 bedeutet dies eine Trassenlänge von 1.447 trm.

In der dritten Variante wird der Trassenverlauf aus Variante 2 beibehalten, jedoch werden hier nur noch die Baukörper und nicht die Gebäudeteile an das Wärmenetz angeschlossen. Dies hat nur eine Auswirkung auf die Randbebauung im östlichen Quartierbereich. Mit dieser Variante kann die Trassenlänge auf 1.181 trm reduziert werden.



Abbildung 144 Trassenverlaufsvarianten BP1987

Das Quartier kann der ST5a (Siedlung kleiner Mehrfamilienhäuser) nach Blesl aus Abbildung 3 zugeordnet werden. Die dieser aus dem Leitfadens Energienutzungsplan zugeordneten Wärmeabnahmedichte von 645 MWh/(ha-a) wird im Vergleich mit der EnEV Variante aus Tabelle 39 nur zu 52% erreicht. Die Passivhausvariante erreicht nur 19%. Wie schon im Quartier Bebauungsplan 1890 ist hier die Steigerung der energetischen Gebäudequalität abzulesen.

Tabelle 39 Wärmeabnahmedichten im Quartier BP1987

Bezug	Variante	Einheit	EnEV	KfW55	Passivhaus
Trassenlänge	1	kWh/(trm·a)	1.354	687	483
Trassenlänge	2	kWh/(trm·a)	1.326	673	473
Trassenlänge	3	kWh/(trm·a)	1.624	825	579
Quartierfläche	1-3	MWh/(ha·a)	337	171	120

4.3 Simulationen

In diesem Abschnitt werden die unter Abschnitt 4.1 beschriebene Quartieren in den drei energetischen Qualitätsstufen (EnEV, KfW55 und Passivhaus) und den drei Wärmenetzvarianten aus Abschnitt 4.2.6 simuliert. In jeder Variante werden jeweils drei verschiedene Dämmklassen des Rohrmaterials (vgl. Abschnitt 2.1.7) untersucht. Zusammen mit den drei Wärmeversorgungskonzepten aus Abschnitt 4.2 ergeben sich 243 Simulationsvarianten.

4.3.1 Parameter

Klimadaten

Die energetischen Kennwerte aus Abschnitt 4.1.3 basieren zum überwiegenden Teil auf Berechnungen nach EnEV und somit auf dem Deutschlandklima aus Abschnitt 2.1.4, dem das Testreferenzjahr für Potsdam (Region 04) zu Grunde liegt. Deshalb erfolgen die weiteren Berechnungen in diesem Kapitel auf Basis dieser Klimadaten.

Rohrmaterial

Die Untersuchung anhand der Quartiere soll zeigen, ob und wie Wärmenetze in neu zu errichtenden Quartieren funktionieren. Diese Wärmenetze können während der Bauphase errichtet werden, ohne dass hierfür Kosten zur Wiederherstellung der Oberflächen anfallen. Deshalb wird in der Simulation der Rohrdatensatz für unbefestigte Verlegung verwendet. Diese im städtischen Kontext gebauten Wärmenetze sind auf eine langfristige Nutzung ausgelegt, weshalb als zweiter Parameter bei der Wahl des Rohrmaterial starre Leitungen gewählt wird.

4.3.2 Ergebnisse Netzverluste

Nach der Simulation aller Wärmenetzvarianten werden die Ergebnisse mit Hilfe von RStudio ausgewertet. In Abbildung 145 sind die relativen Netzverluste, bezogen auf die transportierte Wärmemenge, für jedes Quartier (Zeilen) und jede Trassenvariante (Spalten) dargestellt. Hierbei stehen die roten Kurven für das Wärmeversorgungskonzept Biomethan BHKW 90/60 nach Abschnitt 4.2.1. In orange sind die Kurven des Wärmeversorgungskonzepts Sole/Wasser Wärmepumpe 60/30 nach Abschnitt 4.2.2 und in gelb die des Wärmeversorgungskon-

zepts Niedrigtemperaturnetz nach Heissler et al. aus Abschnitt 4.2.3 dargestellt. Die Volllinien beschreiben dabei die Netze in Dämmklasse 1, die gestrichelten Linien die Netze in Dämmklasse 2 und die gepunkteten Linien die Netze in Dämmklasse 3. In jedem Diagrammquadrat befindet sich links die energetische Qualitätsstufe EnEV, mittig die energetische Qualitätsstufe KfW55 und rechts die energetische Qualitätsstufe Passivhaus.

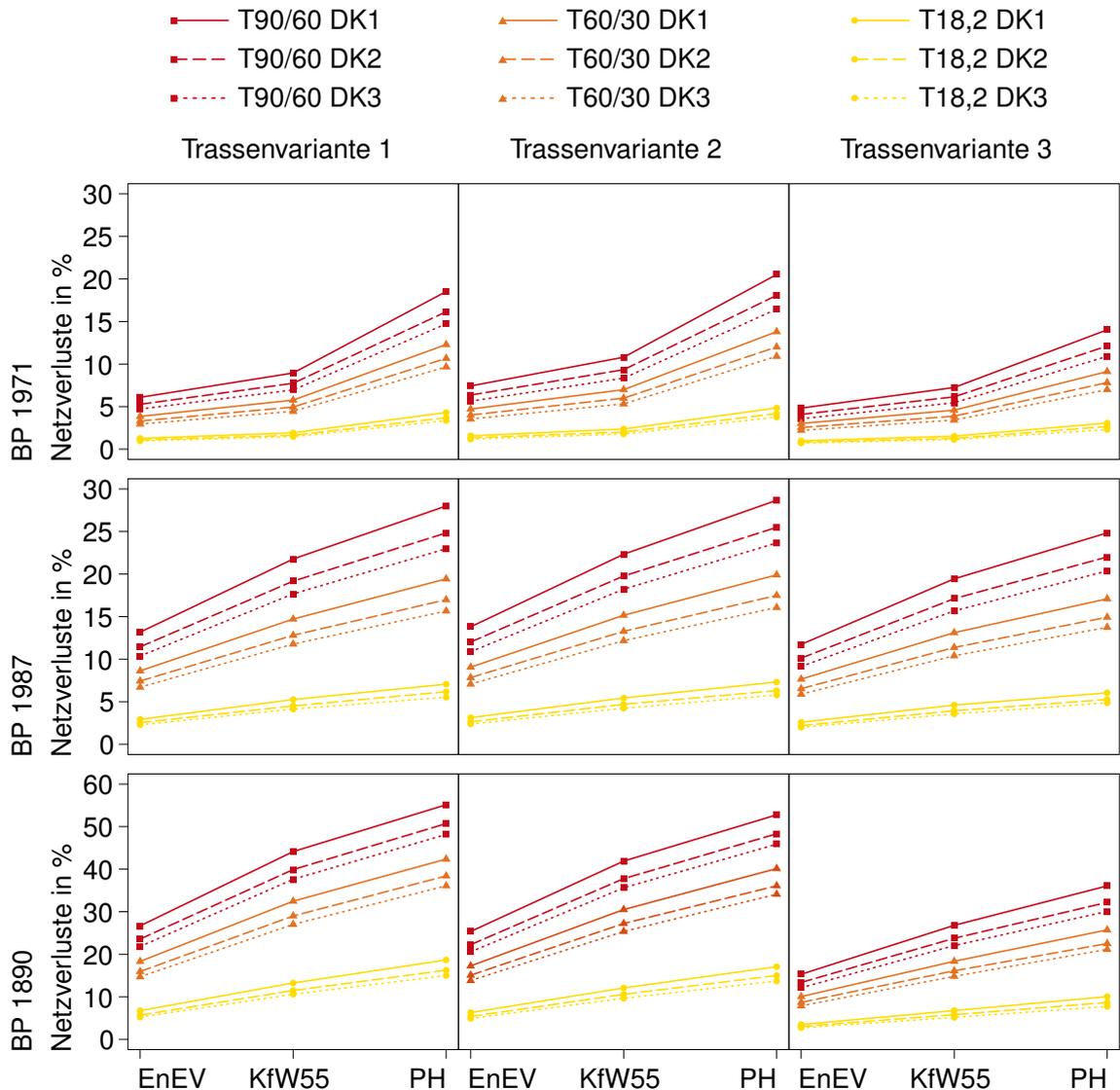


Abbildung 145 Auswertung der Netzverluste

Abweichend zu den oben dargestellten Quartieren reicht im Quartier BP 1890 die Skalierung der Netzverluste bis 60%. Der Abstand zwischen den Linien der einzelnen Dämmklassen ist umso ausgeprägter, je höher die Netzverluste sind. Dies zeigt, dass bei hohen Netzverlusten durch die Wahl einer höheren Dämmklasse das höhere Einsparpotenzial besteht. Die Verluste liegen in der Reihenhaussiedlung BP 1890 in den meisten Fällen deutlich über 10%. Dies erklärt die gegenüber den beiden darüber abgebildeten Quartieren, die nahezu doppelt so hohen Wärmepreise in Abbildung 149. Das Reihenhausquartier eignet sich durch seine Kleinteiligkeit nur bedingt für eine zentrale Versorgung. Im Gegensatz dazu zeigt das Quartier BP 1971 über alle Energiestandards hinweg Verluste zwischen 10% und 20%. Dies führt in

Abbildung 149 bis auf eine Ausnahme zu einem stabilen Wärmepreis. Das Quartier BP 1987 liegt von den Verlusten in etwa zwischen den beiden anderen Quartieren und schafft trotzdem Wärmepreise die sehr nahe am Quartier BP 1971 liegen. Dies zeigt, dass erst ab 20 % Verlust die Wärmepreise stark ansteigen.

4.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

4.4.1 Verfahren

In dieser Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird eine Berechnung der Annuitäten nach dem Verfahren der VDI Richtlinie 2067 Teil 1 [111] durchgeführt. Diese erfasst sämtliche Kosten die innerhalb eines vorab bestimmten Betrachtungszeitraums auftreten. Hierunter fallen kapitalgebundene Kosten, bedarfsgebundene Kosten, betriebsgebundene Kosten und sonstige Kosten sowie Erlöse. Aus diesen Kosten werden durch Multiplikation mit den zugehörigen preisdynamischen Barwertfaktoren Barwerte berechnet. Hierbei finden auch Preissteigerungen Berücksichtigung. Ebenso werden künftige Zahlungen auf das heutige Niveau abgezinst. Die Barwerte sind somit die Summe aller im Betrachtungszeitraum auftretenden Zahlungen abzüglich darüber hinaus reichender Restwerte. Durch Multiplikation der einzelnen Barwerte mit einem Annuitätsfaktor werden diese gleichmäßig auf den Betrachtungszeitraum aufgeteilt. Die Summe der so berechneten Annuitäten erlaubt einen realistischen Wirtschaftlichkeitsvergleich unterschiedlicher Varianten.

4.4.2 Variablen

Betrachtungszeitraum

Als Betrachtungszeitraum empfiehlt die VDI Richtlinie 2067 Teil 1 [111, S. 11] für das Teilsystem Heizung und Sanitär einen Zeitraum von 20 Jahren. Dieser wird deshalb für den Wirtschaftlichkeitsvergleich der Wärmeversorgungsanlagen in den Quartieren übernommen.

Zinssätze

Zum Abzinsen der zukünftigen Zahlungen wird der durchschnittliche Effektivzins für Hypothekendarlehen in Deutschland aus dem Zehnjahreszeitraum von 2009 bis 2018 vom Verband deutscher Pfandbriefbanken nach Statista [141] verwendet. Dieser beträgt 2,53 %.

Preisänderungsfaktoren

Die jährliche Änderung des Preisindex der kapitalgebundenen Kosten wird aus dem Index der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Inlandsabsatz): „Gewerbliche Erzeugnisse insgesamt“ des statistischen Bundesamtes [125] entnommen. Hierzu wird, wie in Abbildung 146 dargestellt, durch lineare Regression aus dem Verlauf der Werte die durchschnittliche Veränderung im Zeitraum 2005 bis 2019 berechnet. Diese beträgt jährlich +0,89 %.

Ebenso erfolgt in Abbildung 146 die Berechnung der durchschnittlichen Veränderung des Preisindex der Verbraucherpreise CC13-0451010000 Strom aus den Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihen von Januar 2005 bis November 2020 des statistischen Bundesamtes [142, S. 46]. Hier beträgt die jährliche Steigerung +3,40 %.

Die rechte Kurve in Abbildung 146 zeigt die Entwicklung der Jahreswerte des Preisindex für Fernwärme des statistischen Bundesamtes. Mit den Werten aus CC13-0455002200 Fernwärme [142, S. 54] ergibt sich eine durchschnittliche Preisanpassung um +1,54 %.

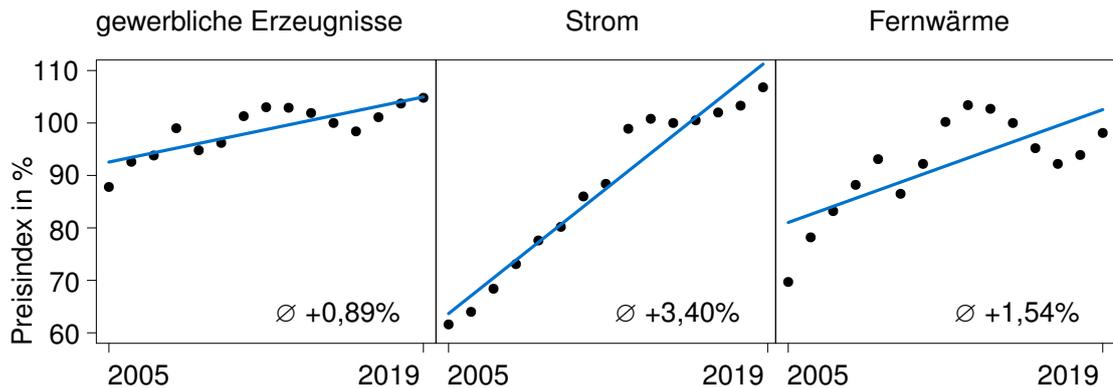


Abbildung 146 Preisentwicklung gewerbliche Erzeugnisse, Strom und Fernwärme (Quelle: Daten aus [125][142])

Für die Berechnung des Preisänderungsfaktors zum Bezug von Biomethan werden mehrere Veröffentlichungen aus dem Zeitraum von 2013 bis 2020 der Deutschen Energie-Agentur GmbH verwendet [143][144][145][128]. In Abbildung 147 sind die Jahreswerte dieser Quellen und die zugehörigen Regressionsgerade eingetragen. Es ergibt sich eine jährliche Preisanpassung von -0,90 %.

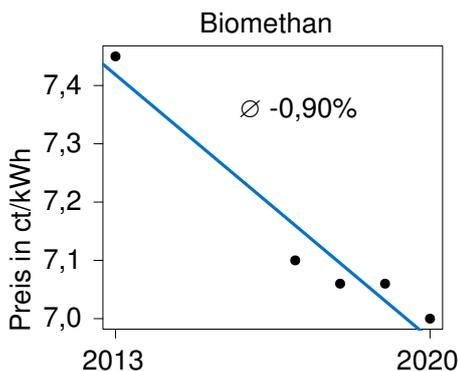


Abbildung 147 Preisentwicklung Biomethan (Quelle: Daten aus [143][144][145][128])

Aus dem Ergebnis 61311-0005: Erzeugerpreisindex für Dienstleistungen: Deutschland, Jahre, Dienstleistungsart DL-TU02 Maschinen- und Anlagenprüfung des statistischen Bundesamtes [146] entstammen die Werte in Abbildung 148. Hieraus berechnet sich der durchschnittliche jährliche Preisanpassungsfaktor zu +1,81 %.

Sonstige Kosten, wie z.B. Versicherungen, etc., bleiben in dieser Analyse unberücksichtigt. Da die Erlöse nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) als fester Fördersatz ausge-

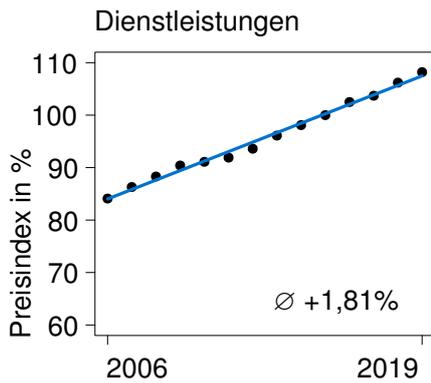


Abbildung 148 Preisentwicklung Dienstleistungen (Quelle: Daten aus [146])

zahlt werden und sich in die Laufzeit von 20 Jahren nicht ändert, beträgt der Preisänderungsfaktor für Erlöse $\pm 0\%$.

4.4.3 Ergebnisse

Mit diesen Eingabedaten erfolgt einerseits für jede der 243 zentralen Wärmeversorgungsvarianten eine Wirtschaftlichkeitsberechnung, andererseits wird in den 54 dezentralen Wärmeversorgungsvarianten (hierzu zählt auch die Fernwärmevariante) für jedes Gebäude eine Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt, deren Ergebnisse auf das Quartier aufsummiert werden.

In Abbildung 149 sind die Ergebnisse dieser Berechnungen als resultierende Wärmepreise zusammengefasst. Analog zur Darstellung der Netzverluste sind auch hier die Quartiere den drei Zeilen und jede Trassenvariante einer Spalte zugeordnet. Die Quartiere sind von unten nach oben entsprechend ihrer Wärmeabnahmedichte geordnet. Unten befindet sich das Quartier BP1890 der Reihenhaussiedlung mit einer mittleren Wärmeabnahmedichte von 138 MWh/(ha·a). Darüber befinden sich die Ergebnisse des Quartiers BP1987 mit Randbebauung und Punkthäusern. Hier beträgt die mittlere Wärmeabnahmedichte 209 MWh/(ha·a). In der oberen Zeile sind die Ergebnisse des Quartiers BP1971 mit organischer Zeilenbebauung und Mischnutzung aufgeführt. In diesem Quartier beträgt die mittlere Wärmeabnahmedichte 474 MWh/(ha·a). Aufgrund der hohen Wärmepreise im Quartier BP1890 wird hier eine andere Skalierung der Wärmepreise verwendet als bei den beiden anderen Quartieren.

Im Quartier BP1890 bestehen die größten Unterschiede zwischen den energetischen Gebäudequalitäten EnEV und Passivhaus. Die rechte Spalte zeigt jeweils die Variante, in der die Anzahl der Gebäudeanschlüsse und die damit verbundene die Netzlänge reduziert ist. Hier kann man gut die Auswirkung auf die Varianten dezentrale Luft-Wasser-Wärmepumpe (dez. LWWP) und Fernwärme Stadtwerke München (FW SWM) erkennen. Viele Gebäudeanschlüsse führen in diesen Varianten zu hohen Errichtungskosten, die in den drei Gebäudequalitäten nahezu gleich hoch ausfallen. Die höheren Wärmepreise in den Passivhausvarianten sind eine Folge der niedrigen Wärmeabnahme in dieser Gebäudequalität, auf die sich die Wärmepreise beziehen.

Die gelbe Variante Niedrigtemperaturnetz nach Heissler et al. (T18,2) weist die höchsten Wärmepreise auf. Dies hängt mit den enormen Investitionskosten für die aufwendige Technik zusammen. Dadurch verhält sich diese Variante ähnlich der dezentralen blauen Variante dez. LWWP. In den Quartieren BP1971 und BP1987 liegt der Wärmepreis für diese Variante im Bereich aller anderen Varianten Quartier BP1890. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass sich eine solche Wärmeversorgung nicht für eine Reihenhaussiedlung eignet, in den übrigen Bebauungen aber durchaus denkbar ist.

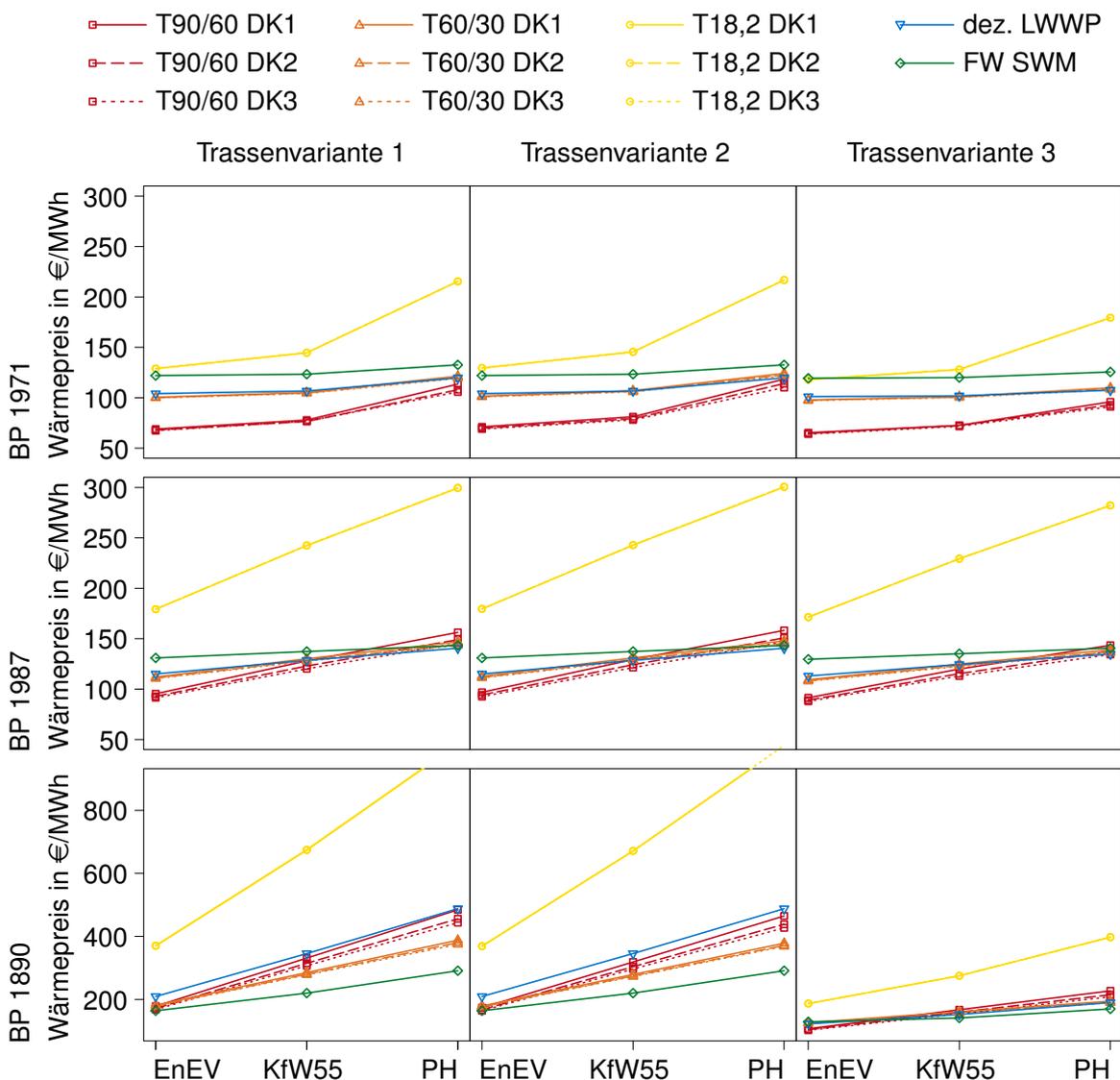


Abbildung 149 Auswertung der Wirtschaftlichkeit

Erstaunlich ist, dass die Wärmeversorgungsvariante T90/60 trotz der hohen Netzverluste in nahezu allen Fällen eine wirtschaftliche Variante darstellt. Dies liegt am Erlös des erzeugten Stroms über die Einspeisevergütung nach EEG 2017.

Die Quartiere weisen von oben nach unten eine abnehmende Wärmedichte auf. Zudem erhöht sich von oben nach unten die „Kleinteiligkeit“ durch eine steigende Anzahl an Gebäudeteilen. Beide Effekte führen zusammen, wie in Abbildung 145 ersichtlich, in den unteren

Quartiervarianten zu hohen Netzverlusten und hohen Wärmepreisen in Abbildung 149. Die Auswirkung auf die Wärmepreise betrifft jedoch nicht nur die zentralen Wärmeversorgungssysteme, sondern lässt sich auch bei der Variante mit den dezentralen Luft-Wasser Wärmepumpen und der Variante Fernwärme SWM erkennen. Zur besseren Visualisierung dieses Effektes sind in Abbildung 150 die Wärmepreise auf die Netzverluste bezogen. Für die Varianten dez. LWWP und FW SWM wurden die Preise auf die jeweils in der T90/60 Variante auftretenden Netzverluste bezogen. Es ist zu erkennen, dass ab einem Netzverlust von ca. 10% die Wärmepreise langsam steigen und ab 20 - 30 %-igen Netzverlusten in einen steileren Anstieg übergehen.

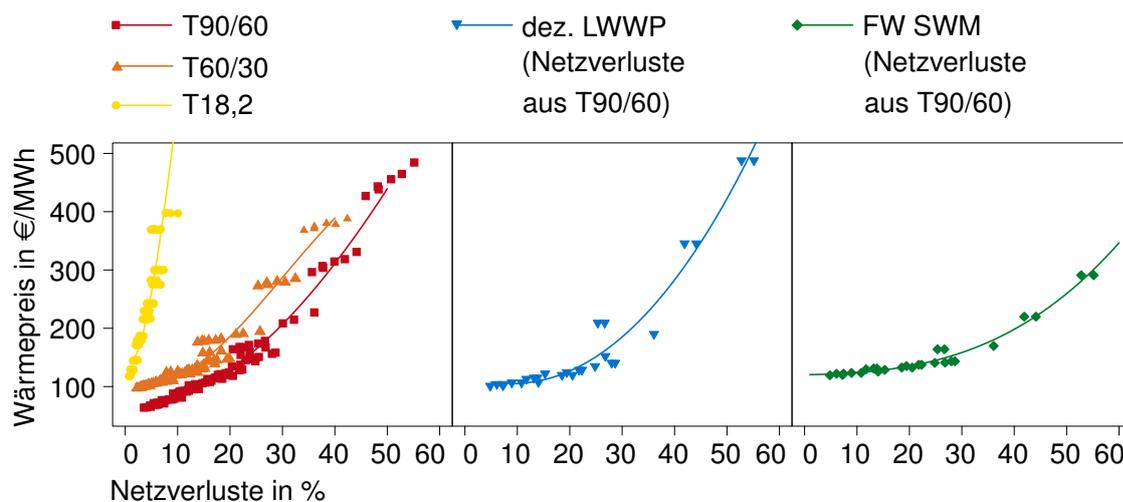


Abbildung 150 Darstellung Wärmepreise auf Basis von Netzverlusten

Werden die Wärmeverluste bestimmt, kann daraus ein Rückschluss auf die zu erwartenden Wärmepreise gezogen werden. Als Handlungsempfehlung sollte neben einer ausreichenden Wärmedichte auch auf eine möglichst geringe Anzahl an Baukörpern bzw. Gebäudeeinheiten geachtet werden. Als Gebäudeeinheit wird in diesem Zusammenhang ein Gebäude oder Gebäudeteil gesehen, in dem eine eigene Heizzentrale zu errichten ist. Je mehr Gebäudeteile in diesem Sinne zusammen gefasst werden können, desto niedriger liegt der Wärmepreis sowohl bei zentralen als auch dezentralen Versorgungsarten.

In Abbildung 151 sind die Netzverluste aller Varianten aus diesem Kapitel in das Diagramm von Pex (Abbildung 2) eingetragen. Dieses Diagramm zeigt die Netzverluste in Abhängigkeit der längenbezogenen Wärmebedarfsdichte bzw. der Wärmebelegungsdichte. Hierin ist gut die Abhängigkeit der Verluste von der Netztemperatur erkennbar. Es zeigt sich, dass auch hier der Richtwert von 1,5 MWh/(ha·a) kein Garant für Netzverluste unterhalb des Zielwerts ist.

Wechselt man die Bezugsebene auf die Quartierfläche, so entsteht das Diagramm in Abbildung 154. Hier wird deutlich, dass durch den Flächenbezug die Bandbreiten der Netzverluste noch größer werden, was zeigt, dass auf dieser Basis erst ab Wärmebedarfsdichten über ca. 500 MWh/(ha·a) alle Varianten den Zielwert erreichen.

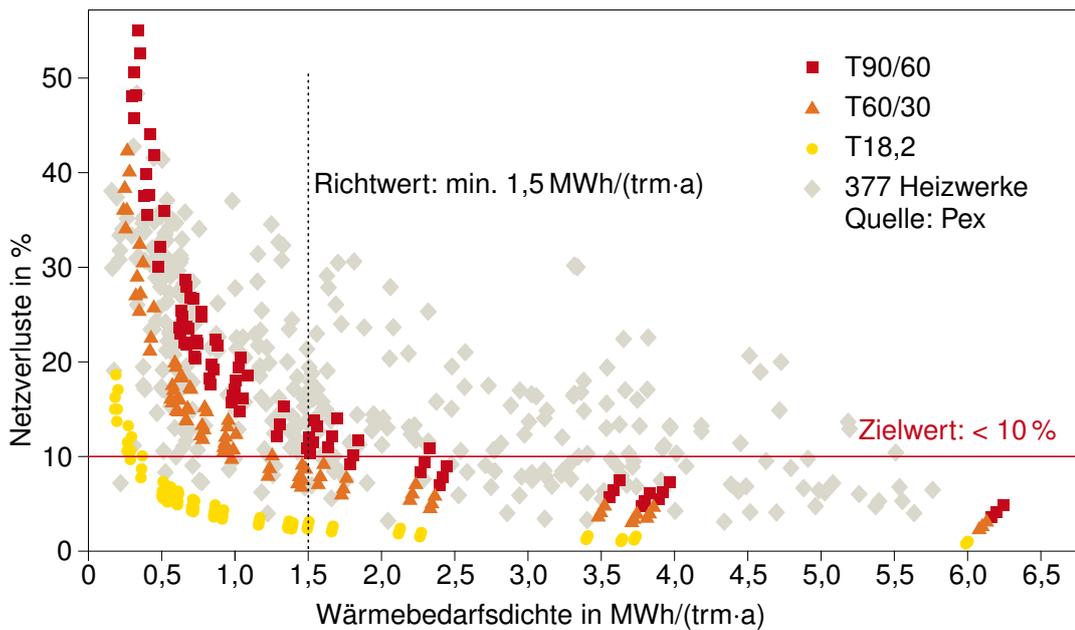


Abbildung 151 Auswertung der Netzverluste auf Netzlänge bezogen (Quelle: In Anlehnung an [11, S. 35])

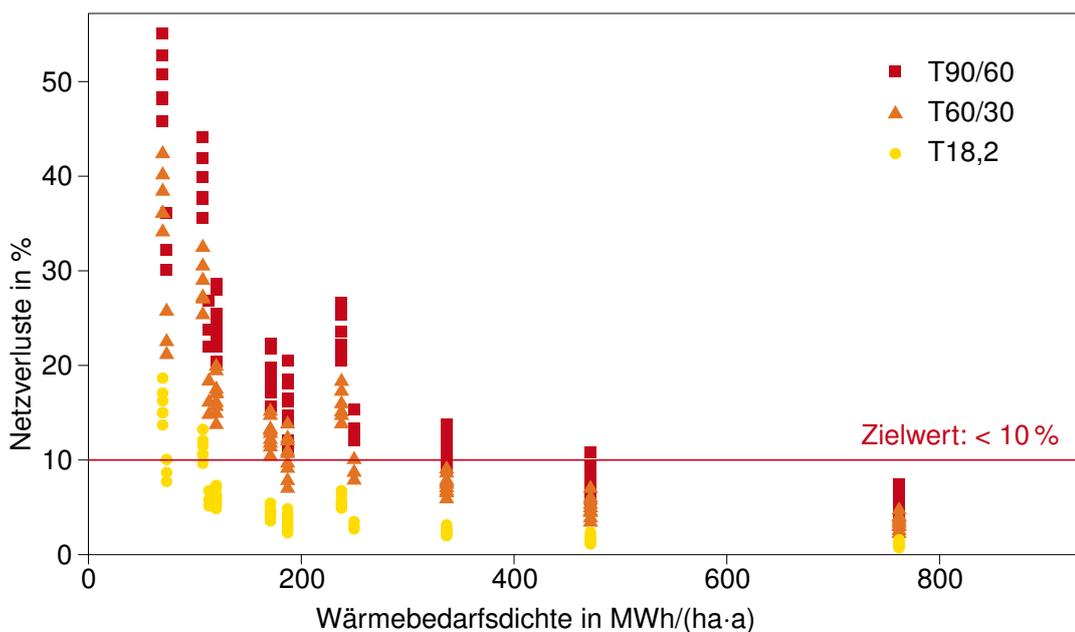


Abbildung 152 Auswertung der Netzverluste auf Quartierfläche bezogen

4.5 Emissionsanalyse

4.5.1 CO₂-Äquivalente

Für jede Variante wird im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse eine Bilanz der CO₂-Äquivalente erstellt. Hierzu werden die CO₂-Faktoren der Energieträger aus Abschnitt 4.2 mit der benötigten Energiemenge je Energieträger multipliziert. Wird in einer Variante Strom ins öffentliche Netz eingespeist, werden die dabei zugeordneten CO₂-Äquivalente von den CO₂-Äquivalenten der aufzuwendenden Energieträger abgezogen. Aus dieser Bilanzierung ent-

stehen die Diagramme in Abbildung 153. Hier sind in rot das Wärmeversorgungskonzept Biomethan BHKW 90/60 aus Abschnitt 4.2.1, in orange das Wärmeversorgungskonzept Sole/Wasser Wärmepumpe 60/30 aus Abschnitt 4.2.2 und in gelb das Wärmeversorgungskonzept Niedrigtemperaturnetz nach Heissler et al. aus Abschnitt 4.2.3 eingetragen. In diesen netzgebundenen Wärmeversorgungskonzepten gibt es drei Unterkategorien, die sich aus den unterschiedlichen Dämmklassen des Wärmenetzes ergeben. In der Darstellung in Abbildung 153 bedeutet die durchgezogene Linie Dämmklasse 1, die gestrichelte Linie Dämmklasse 2 (1 x verstärkt) und die gepunktete Linie Dämmklasse 3 (2 x verstärkt).

Die blaue Darstellung zeigt das Wärmeversorgungskonzept Luft-Wasser-Wärmepumpen dezentral aus Abschnitt 4.2.4. In grün erfolgt die Darstellung des Wärmeversorgungskonzeptes Fernwärme Stadtwerke München aus Abschnitt 4.2.5.

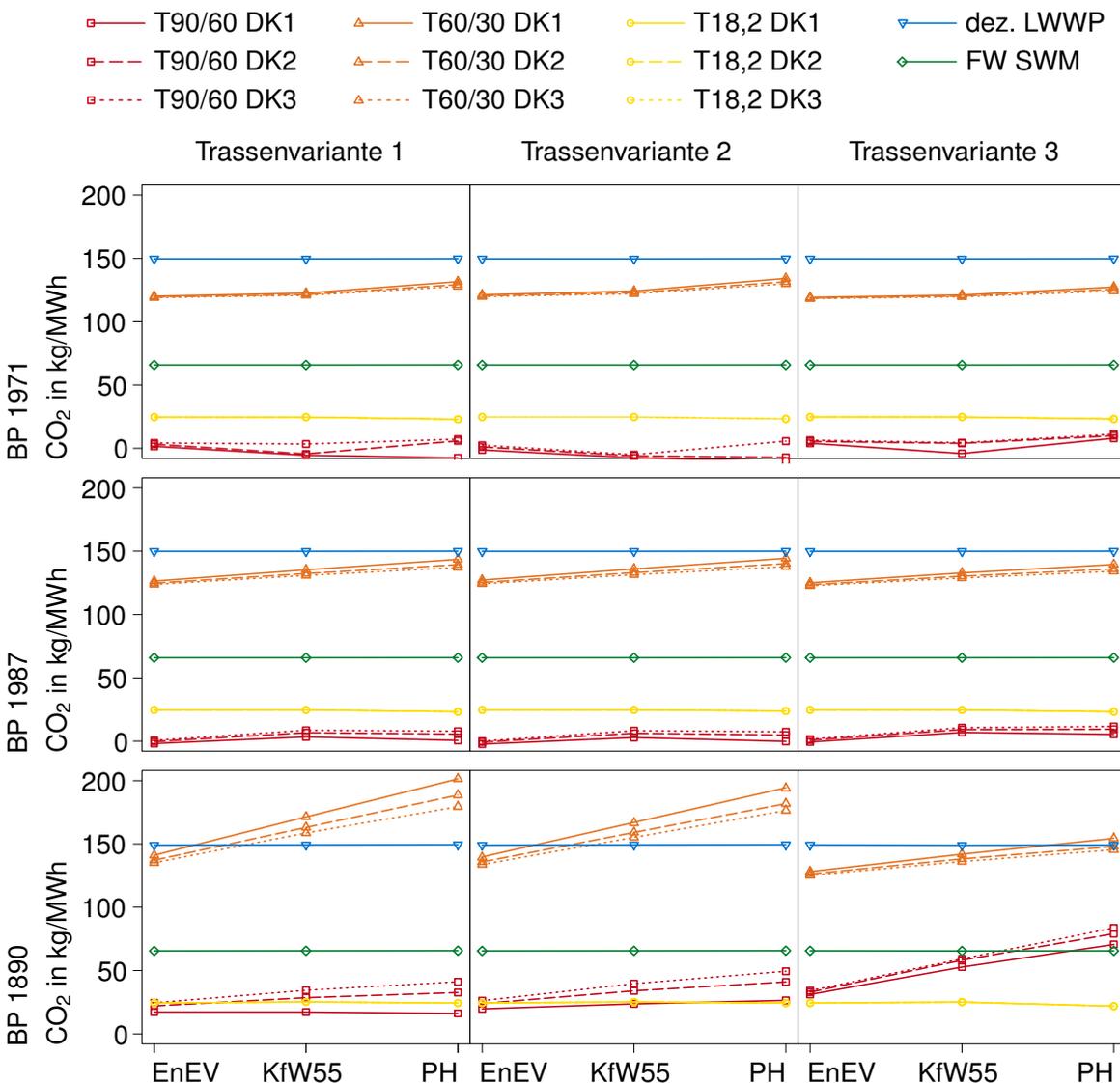


Abbildung 153 Darstellung der CO₂-Äquivalente

4.5.2 Ergebnisse Emissionsanalyse

In der Abbildung 153 sind das blaue und grüne Konzept in allen neun Feldern durch jeweils eine horizontale Linie vertreten. Dies lässt sich dadurch erklären, dass in diesen Konzepten die benötigte Wärmemenge direkt proportional zur bezogenen Menge an Endenergie ist. Hierbei wird der Unterschied zwischen der 66 g/kWh CO₂-Äquivalente für die Fernwärme und den 407 g/kWh CO₂-Äquivalente für den elektrischen Strom zum Betrieb der Wärmepumpen deutlich. Diesen Unterschied kann auch die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen nicht mehr ausgleichen, so dass die blaue Kurve etwas mehr als doppelt so hoch liegt als die grüne.

Auch in der orangen Konzeptvariante schlägt der hohe CO₂-Faktor für den Strom durch. Diese liegt bei den Quartieren mit niedrigen Netzverlusten wegen der höheren Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe unter der blauen Kurve. In den Quartieren mit hohen Netzverlusten schwindet dieser Vorteil und führt dazu, dass im Quartier BP1890 die dezentrale Wärmepumpenvariante bessere CO₂-Werte erreicht.

Wegen der geringen Netzverluste und der hohen solaren Erträge, sind die CO₂-Werte des Niedrigtemperaturnetzes nach Heissler et al. sehr niedrig und werden nur noch in den Quartieren BP1971 und BP 1987 von der roten Konzeptvariante unterboten.

Das Wärmeversorgungskonzept Biomethan BHKW 90/60 erreicht diese niedrigen CO₂-Werte aufgrund des großen Unterschieds zwischen der 71 g/kWh CO₂-Äquivalente für das bezogene Biomethan und der 407 g/kWh CO₂-Äquivalente für den ins öffentliche Netz eingespeisten elektrischen Stroms. Dieser hohe Unterschied führt im Quartier BP1971 sogar zu negativen Werten. Als weiteren Effekt der damit in Zusammenhang steht, erkennt man in Abbildung 153 den Unterschied des Verlaufs der roten Linien gegenüber der orangen Linien. Bei den roten Linien verlaufen diejenigen mit höherem Dämmstandard über denen mit niedrigerem. Das bedeutet, dass für die CO₂-Äquivalente die Werte niedriger liegen, je höher die Netzverluste sind. Damit erklärt sich, dass hierbei noch mehr Strom mit einem hohen CO₂-Wert ins Netz gespeist werden kann und von den Aufwendungen subtrahiert wird. Bei den orangen Linien bedeuten höhere Netzverluste auch höhere CO₂-Emissionen. In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zahlt sich diese Art der „Optimierung“ der CO₂-Äquivalente durch höhere Netzverluste nicht aus, wie in Abbildung 149 ersichtlich ist.

4.6 Anwendung Algorithmus

Zur solideren Einschätzung der auftretenden Wärmepreise und CO₂-Emissionen kann mit dem in dieser Arbeit entwickeltem Algorithmus eine Bestimmung der tatsächlichen Netzverluste erfolgen. Hierzu sind lediglich die drei Größen Quartierfläche, Gesamtwärmebedarf und Anzahl der Gebäudeanschlüsse erforderlich.

In Abbildung 154 ist die Prognosequalität anhand der in diesem Kapitel berechneten Daten dargestellt. Hierin sind auf der Abszissenachse die simulierten Netzverluste denen durch

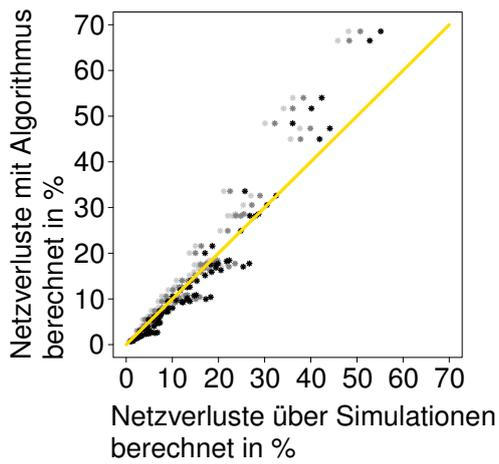


Abbildung 154 Vergleich Netzverluste Algorithmus versus Simulation

den Algorithmus berechneten auf der Ordinatenachse gegenübergestellt. Man erkennt bis zu etwa 30 % eine gute Prognosegüte. Erst ab dieser Höhe neigt der Algorithmus dazu, die Verluste zu überschätzen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In der Quartiersentwicklung fallen schon zu Beginn wichtige Entscheidungen, die Auswirkungen auf die künftigen Wärmepreise und CO₂-Emissionen haben können. Jedoch ist zu diesem Zeitpunkt die Planung in der Regel noch nicht weit genug fortgeschritten, um Simulationsrechnungen anwenden zu können. Deshalb wurde in dieser Arbeit ein heuristisches Verfahren zur Prognose von Nahwärmenetzverlusten entwickelt, das auf Basis einer geringen Datengrundlage Aussagen zu potenziellen Wärmenetzverlusten treffen kann. Durch den hier entwickelten Algorithmus ergibt sich die Möglichkeit, erste Planungsvarianten über die potenziellen Wärmenetzverluste miteinander zu vergleichen.

Die Anwendung dieses Algorithmus in der frühen Phase einer Quartiersentwicklung basiert darauf, nur Daten zu verwenden, die in dieser Phase leicht zu erheben sind. Deshalb nutzt der Algorithmus die drei Kennwerte: Quartierfläche, Anzahl Gebäudeteile und Gesamtwärmebedarf. Letzterer kann über siedlungsbezogene oder gebäudebezogene Kennwerte ermittelt werden. Im Rahmen der Literaturlaufarbeitung wurden diese Werte erfasst und in den ersten Kapiteln übersichtlich dargestellt. Optional können durch die zusätzliche Eingabe der Vor- und Rücklauftemperaturen Wärmeverluste von Netzen mit niedrigen Systemtemperaturen berechnet werden.

Die Entwicklung und Validierung der einzelnen Algorithmusteile basiert auf Daten, welche aus der Simulation synthetischer und realer Wärmenetzprojekte entstehen. Für diese Simulationsberechnungen wird in einem ersten Schritt die Software rfWärme entwickelt. Dazu wird als Programmiersprache das von Benoit Minisini entwickelte Gambas verwendet. Die Simulationsberechnung in rfWärme arbeitet in Stundenschritten. Die Umrechnung der Jahreswärmebedarfswerte in den Gebäuden auf eine stündliche Durchschnittsleistung erfolgt durch das Standardlastprofilverfahren aus der Gaswirtschaft. Die hierzu erforderlichen Klimadaten bezieht das Programm durch direkten Zugriff auf das Climate Data Center des Deutschen Wetterdienstes. Als Eingangsdaten für die Geometrie benötigt das Programm drei GIS-Layer. Im ersten dieser drei Layer sind die Gebäude mit ihrem Jahreswärmebedarf und der Art des Lastprofils als Punkte enthalten. Der zweite Layer gibt als Punktlayer die Lage der Wärmezentrale wieder. Dieser Layer benötigt keine weiteren Attribute. Als letzter Layer ist ein Linienlayer erforderlich, der das Wärmenetz beinhaltet und somit die Abnehmer mit dem Punkt der Zentrale verbindet. Die Software rfWärme wird anhand der Fernwärmeversorgung in Neueckerode validiert.

In der Entwicklung des Algorithmus wird in zwei Schritten vorgegangen. Im ersten Schritt wird auf Basis der Quartierfläche und der Anzahl der Gebäudeanschlüsse die Trassenlänge ermittelt. Im zweiten Schritt wird mit dieser Trassenlänge und dem Gesamtwärmebedarf der längenbezogene Wärmebedarf gebildet. Dieser wird mit dem auf die Quartierfläche bezogenen Wärmebedarf multipliziert und dient als Eingangsgröße zur Bestimmung der Netzverluste.

Die Entwicklung der beiden Algorithmusteile erfolgt anhand eines auf statischen Werten basierenden Siedlungsmodells. Das Basismodell beinhaltet eine Siedlungsfläche von 15.600 m², 20 Gebäude und ein Wärmenetz mit 528 trm. Durch Variation der Parameter Gebäudeanzahl und Siedlungsfläche sowie dem Vervielfachen dieser Siedlung durch Aneinanderfügen mittels Multiplikator entstehen 67.770 Varianten. Durch eine Korrelationsanalyse wird die hohe Qualität des Zusammenhangs des Terms „Siedlungsfläche · Gebäudeanzahl“ und der „Länge des Wärmenetzes“ nachgewiesen. In einer darauf folgenden Regressionsanalyse wird für diesen Zusammenhang eine mathematische Formel zur Berechnung der Netzlänge entwickelt. Diese stellt den ersten Teil des Algorithmus dar.

Im zweiten Teil werden 36 dieser Siedlungsvarianten zur Simulation in rfWärme mit jeweils drei unterschiedlichen Wärmebedarfsdichten ausgewählt. Aus diesen Berechnungen gehen die Wärmeverluste von 108 Netzvarianten hervor. Eine mit den Ergebnissen erstellte Korrelationsanalyse der beiden Größen spezifischer Wärmebedarf und Netzverluste ergibt eine hohe negative Korrelation. Der spezifische Wärmebedarf besteht in diesem Fall aus dem Produkt des siedlungsflächen- und des netzlängenbezogenen Wärmebedarfs. Über eine Regressionsanalyse wird eine Formel ermittelt, mit der aus dem spezifischen Wärmebedarf die Netzverluste berechnet werden können.

Die Anpassung der Netztemperaturen erfolgt über eine einfache Verhältnisgleichung. Die Summe der treibenden Temperaturdifferenzen zwischen den Netztemperaturen und der Erdreichtemperatur bildet hierbei die Basis. Diese Differenz berechnet sich bei zuvor gewählten Erdreichtemperatur von 10 °C zu 120 K und wird als Nenner verwendet. Nun kann mit beliebigen Netztemperaturen die Summe der Temperaturdifferenzen im Zähler dieser Verhältnisgleichung berechnet werden. Die Multiplikation dieses Bruchs mit dem Wert des Netzverlustes ergibt den, an die neuen Netztemperaturen angepassten, Netzverlust.

Im letzten Kapitel wird untersucht, wie gut unterschiedliche Wärmekonzepte in verschiedenen Quartieren funktionieren. Ziele dieser Untersuchung ist es, die Wirtschaftlichkeit und die CO₂-Emissionen innerhalb, aber auch zwischen den Quartieren, zu analysieren. Hierzu werden drei städtische Quartiere aus Bebauungsplänen der Stadt München verwendet. Diese bilden das Spektrum von einer reinen Reihenhaussiedlung bis hin zu einem Quartier dichter Bebauung und Mischnutzung ab. Als Wärmeversorgungsvarianten werden zentrale Varianten unterschiedlichen Temperaturniveaus und Wärmezeugung mit einer dezentralen Variante verglichen. Zudem wird die Versorgung mit Fernwärme der Stadtwerke München als weitere Variante mit eingebunden. Da sich alle diesbezüglichen Angaben auf den einzelnen Gebäudeanschluss beziehen, verhält sich diese Variante als wäre sie dezentral. Die Untersuchung zeigt erstaunlicherweise, dass die Netzverluste nicht nur die Wirtschaftlichkeit der zentralen Systeme beeinflussen, sondern sich auch auf die dezentralen Varianten auswirken.

Dies kann damit erklärt werden, dass hohe Netzverluste zum einen aus niedrigen Abnahmedichten resultieren und zum anderen häufig bei einer Vielzahl an Gebäudeanschlüssen

auftreten. Beides führt auch bei dezentralen Varianten zu höheren Investitionskosten, da einerseits für jede Gebäudezentrale eine eigene Technikinstallation Investitionskosten verursacht und sich andererseits die Gesamtkosten auf eine geringere Wärmemenge verteilen. Dies hat hohe spezifische Wärmepreise zur Folge. Als Grenzwert ist der Bereich zwischen 15 % und 20 % auszumachen. Ab diesem Bereich erhöht sich in allen Varianten der Anstieg der Wärmepreise deutlich. Die Varianz der CO₂-Emissionen ist nicht so stark ausgeprägt wie bei den Wärmepreisen und zudem stark abhängig vom Versorgungskonzept. Bei den dezentralen Varianten ergibt sich keine Veränderung, da die CO₂-Emissionen hier ausschließlich von der bezogenen Endenergiemenge abhängt. Darüber hinaus ist anzumerken, dass die Art des Energieträgers maßgeblich die Höhe der Emissionen bestimmt. Ebenso wirken sich im Quartier erzeugte und ausgespeiste Energiemengen positiv auf das jeweilige Konzept aus.

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass in einer Quartiersentwicklung eine frühzeitige Information über die zu erwartenden Netzverluste einen Vergleichswert zur Abschätzung der spezifischen Wärmeenergiekosten erzeugt. Mit dieser Methode kann in einer frühen Phase die Quartiersentwicklung optimiert werden. Die Anwendung dieser Methode ist nicht dazu gedacht, in weiteren Planungsphasen tiefergehende Berechnungen oder Simulationen zu ersetzen. Vielmehr ist sie ein erster Schritt, der erfolgen kann, bevor für die weiteren Berechnungen ausreichend Daten vorhanden sind. Sie eignet sich auch dazu in Wettbewerbsverfahren die Berechnungsergebnisse der Bewerber auf Plausibilität zu prüfen.

Literatur

Literatur

- [1] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) and Bundesstelle für Energieeffizienz (BfEE), *Nationaler Energieeffizienz-Aktionsplan (NEEAP) 2017 der Bundesrepublik Deutschland*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) Öffentlichkeitsarbeit, März 2017.
- [2] K. M. Heissler, J. Metz, W. Lang, T. Auer und I. Nemeth, "Potenziale von Niedrigtemperaturnetzen zur Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien in Quartieren", Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Techn. Ber., 2017. DOI: 10.14459/2017md1403265.
- [3] G. Hausladen und T. Hamacher, "Leitfaden Energienutzungsplan", Technische Universität München, 21. Feb. 2011.
- [4] T. Esch, H. Taubenböck, C. Geiß, C. Schillings, M. Nast, A. Metz, W. Heldens und M. Keil, "Potenzialanalyse zum Aufbau von Wärmenetzen unter Auswertung siedlungsstruktureller Merkmale", Förderkennzeichen 3 004 775, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) - Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) - Abteilung Landoberfläche (LA), Forschungsber., 2011.
- [5] Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk (C.A.R.M.E.N. e.V.), "Merkblatt Nahwärmenetze und Bioenergieanlagen - Ein Beitrag zur effizienten Wärmenutzung und zum Klimaschutz", 2013.
- [6] S. Hiendlmeier, "Betriebsdaten geförderter bayerischer Biomasse-Heizwerke - Auswertung Jahresberichte 2011", Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk (C.A.R.M.E.N. e.V.), 10. Jan. 2013.
- [7] —, "Betriebsdaten geförderter bayerischer Biomasse-Heizwerke - Auswertung Jahresberichte 2012", Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk (C.A.R.M.E.N. e.V.), 17. Dez. 2013.
- [8] —, "Betriebsdaten geförderter bayerischer Biomasse-Heizwerke - Auswertung Jahresberichte 2013", Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk (C.A.R.M.E.N. e.V.), 8. Dez. 2014.
- [9] —, "Betriebsdaten geförderter bayerischer Biomasse-Heizwerke - Auswertung Jahresberichte 2014", Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk (C.A.R.M.E.N. e.V.), 14. Jan. 2016.
- [10] —, "Betriebsdaten geförderter bayerischer Biomasse-Heizwerke - Auswertung Jahresberichte 2015", Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk (C.A.R.M.E.N. e.V.), 30. Jan. 2017.
- [11] B. Pex, "Nahwärmenetze und Heizwerke - Erfolgsfaktoren und Erfahrungen", präsentiert auf der Fachtagung: Wärme aus Biomasse – Stand der Technik und Perspektiven, Soest, 2012.

- [12] Kreditanstalt für Wiederaufbau, “Merkblatt Erneuerbare Energien - KfW-Programm Erneuerbare Energien - Premium”, Bestellnummer: 600 000 2410, Aug. 2016.
- [13] K. Engelmann und J. Krimmling, “Vorausberechnung der Wärmeverluste von Fernwärmenetzen”, *Euroheat & power*, Jg. 27, Nr. 11, S. 16–21, 1998.
- [14] M. Blesl, “Räumlich hoch aufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme zur Deckung des Niedertemperaturwärmebedarfs”, Diss., Fakultät Energietechnik der Universität Stuttgart, 2002.
- [15] W. Ebel, W. Eicke-Henning, W. Feist und H.-M. Groscurth, *Der zukünftige Heizwärmebedarf der Haushalte*, 1. Auflage. Darmstadt, Feb. 1996, ISBN: 3-927846-85-6.
- [16] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach und R. Born, *Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*, 2. Auflage. Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2. Okt. 2015, S. 281, ISBN: 978-3-941140-47-9.
- [17] J. Drittenpreis, T. Schmid und O. Zadow, “Energienutzungsplan unter besonderer Berücksichtigung des Denkmalschutzes am Beispiel der Stadt Iphofen - Untersuchung des Potenzials von Nahwärmeversorgungskonzepten in Verbindung mit Sanierungskonzepten denkmalgeschützter, historischer Gebäude in innerörtlichen Quartieren”, Technische Universität München, Okt. 2012.
- [18] C. Zeine, M. Gebhardt, B. Bockting, A. Mantai und J. P. Wei, “Verbrauchskennwerte 2005 Energie- und Wasserverbrauchskennwerte in der Bundesrepublik Deutschland Forschungsbericht der ages GmbH”, ages GmbH, Münster, Version 1. Auflage, Feb. 2007.
- [19] O. Zadow und A. Lesser, “GemEB - Ein Softwarewerkzeug für den Energienutzungsplan zur Berechnung von Energiebedarfsdichten in Siedlungsgebieten - Berechnung des Wärmebedarfs unter Einbeziehung von Sanierungskonzepten nicht-historischer und historischer Wohngebäude in Siedlungsgebieten”, Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik, 19. Dez. 2012.
- [20] R. Smutny, D. Österreicher, S. Sattler, M. Treberspurg, K. Battisti, M. Gratzl, E. Rainer und H. Staller, “Low-tech solution for Smart Cities – Optimization tool CityCalc for solar urban design”, in *REAL CORP 2016 Proceedings*, 2016, ISBN: 978-3-9504173-1-9.
- [21] A. Saadat, “Methodische Ansätze zur Erstellung dezentraler multivalenter Energieversorgungskonzepte für Siedlungen im Iran”, Diss., Technischen Universität Berlin, 2003.
- [22] H. Erhorn-Kluttig, R. Jank, L. Schrempf und A. Dütz, *Energetische Quartiersplanung - Methoden - Technologien - Praxisbeispiele*. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag, 2011, ISBN: 978-3-816-78411-1.
- [23] U. Roth und F. Häubi, “Wechselwirkung zwischen Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen”, *Band 98 - Heft 29*, 1980.

- [24] M. Buchert, U. Fritsche, W. Jenseit, L. Rausch, C. Deilmann, G. Schiller, S. Siedentop und A. Lipkow, "Nachhaltiges Bauen und Wohnen in Deutschland", Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, Forschungsbericht 298 92 303/02, 2004.
- [25] D. Everding, *Solarer Städtebau*. Stuttgart: Verlag Kohlhammer W., 2007, ISBN: 978-3170174139.
- [26] M. Gaderer, M. Lautenbach, T. Fischer und G. Ebertsch, *Wärmenutzung bei kleinen landwirtschaftlichen Biogasanlagen*. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Nov. 2007, ISBN: 978-3-940009-32-6.
- [27] R. Nouvel, C. Schulte, U. Eicker, D. Pietruschka und V. Coors, "CityGML-based 3D city model for energy diagnostics and urban energy policy support", *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28, Jg. 2013*, S. 1–7, 2013.
- [28] G. Tardioli, R. Kerrigan, M. R. Oates, J. O'Donnell und D. Finn, "Prediction of building energy use in an urban case study using data driven Approaches", *Proceedings of BS2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India, Dec. 7-9, 2015.*, 2015.
- [29] B. Talebi, P. A. Mirzaei, A. Bastani und F. Haghigat, "A Review of District Heating Systems: Modeling and Optimization", *Frontiers in Built Environment*, Jg. 2, Okt. 2016. DOI: 10.3389/fbuil.2016.00022.
- [30] M. Despotovic, M. Sakeena, D. Koch, M. Döller und M. Zeppelzauer, "Predicting Heating Energy Demand by Computer Vision", *Journal on Computer Science - Research and Development*, S. 231–232, 1. Feb. 2018. Adresse: <https://doi.org/10.1007/s00450-017-0363-6>.
- [31] R. Köcher, "Beitrag zur Berechnung und Auslegung von Fernwärmenetzen", Diss., Fachbereich Verfahrenstechnik, Umwelttechnik, Werkstoffwissenschaften Fachgebiet Energiewandlung und Umweltschutz der Technischen Universität Berlin, 2000.
- [32] S. Gnüchtel und S. Groß, *LowEx Fernwärme Multilevel District Heating, Software zur Verbesserung der Einsatzchancen von Fernwärmesystemen, Forschung und Entwicklung* |, Heft 21. Frankfurt am Main: AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Apr. 2012, ISBN: 3-89999-033-1.
- [33] H. V. Larsen, B. Bøhm und M. Wigbels, "A comparison of aggregated models for simulation and operational optimisation of district heating networks", *Energy Conversion and Management*, Jg. 45, Nr. 7–8, S. 1119–1139, Mai 2004. DOI: 10.1016/j.enconman.2003.08.006.
- [34] H. Pålsson, H. V. Larsen, B. Bøhm, H. F. Ravn und J. Zhou, *Equivalent models of district heating systems for on-line minimization of operational costs of the complete district heating system*. Department of Energy Engineering, Technical University of Denmark und Systems Analysis Department, Risø National Laboratory, 1999, 199 ff, ISBN: 87-7475-221-9.

- [35] A. Loewen, *Entwicklung eines Verfahrens zur Aggregation komplexer Fernwärmenetze*, Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., UMSICHT-Schriftenreihe, 29. Fraunhofer-IRB-Verlag, 2001, ISBN: 3-8167-5909-2.
- [36] C. Dötsch, J. Taschenberger und I. Schönberg, *Leitfaden Nahwärme - UMSICHT-Schriftenreihe*, 6. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag, 1998, ISBN: 978-3-816-75186-1.
- [37] M. Pehnt, A. Paar, P. Otter, F. Merten, T. Hanke, W. Irrek, D. Schüwer, N. Supersberger und C. Zeiss, "Energiebalance – Optimale Systemlösungen für erneuerbare Energien und Energieeffizienz Ergebnisse - FKZ 0327614 - Endbericht", ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg und Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, März 2009.
- [38] J. Schuberth und K. Tschetschorke, "Strom- und Wärmeversorgung einer Siedlung bei unterschiedlichen Energieeffizienz-Standards", Fachgebiet I 2.4 Energieeffizienz Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2013.
- [39] B. Eikmeier, K. Janßen, M. Fette und K. Jahn, "Ermittlung der Potenziale der Kraft-Wärme-Kopplung und der Erdwärme (Wärmepumpen) in Osnabrück", Energiesystemanalyse (ehemals Bremer Energie Institut) Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Bremen, Projektnummer: 214 060, 19. März 2014.
- [40] J. Clausen, "Kosten und Marktpotenziale ländlicher Wärmenetze, Arbeitspapier zu AP 6 A im Rahmen des Projektes „Möglichkeiten und Grenzen von Nahwärmenetzen in ländlich strukturierten Gebieten unter Einbeziehung regenerativer Wärmequellen – Vernetzung von dezentralen Kraft- und Wärmeerzeugungs- Systemen unter Berücksichtigung von Langzeitwärmespeicherung“", Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gGmbH, Hannover, Forschungsber., Juni 2012.
- [41] K. Jagnow und D. Wolff, "Endbericht DBU-Projekt Neuerkerode, DBU-Förderkennzeichen 25241", Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Wolfenbüttel, Forschungsber., 2014.
- [42] GNU General Public License, "Free software foundation", *License used by the Free Software Foundation for the GNU Project*, 1991. Adresse: <http://www.fsf.org/copyleft/gpl.html> (besucht am 17.08.2017).
- [43] —, "version 3", *Free Software Foundation, June, 2007*. Adresse: <http://www.gnu.de/documents/gpl.de.html> (besucht am 07.08.2017).
- [44] J. W. Rittinghouse, "A Beginner's Guide to Gambas", Techn. Ber., Okt. 2005.
- [45] W. Ornth, "Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand", Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, 26. Juli 2007.
- [46] Institut Wohnen und Umwelt GmbH. (2016). TABULA WebTool, Adresse: <http://www.webtool.building-typology.eu/> (besucht am 23.11.2020).

- [47] N. Diefenbach und A. Enseling, *Potentiale zur Reduzierung der CO₂-Emissionen bei der Wärmeversorgung von Gebäuden in Hessen bis 2012, Studie im Rahmen von INKLIM 2012 (Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen 2012)*. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt, 21. Apr. 2007, Bd. 1. Auflage, ISBN: 3-932074-94-7.
- [48] G. Hausladen, O. Zadow, R. Fröhler, P. Vohlidka und J. Schinabeck, *EnEff:Wärme Pilotprojekt Ismanig, Energieleitplanung, Forschung und Entwicklung* |, Heft 22. Frankfurt am Main: AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Okt. 2012, ISBN: 3-89999-035-8.
- [49] E. Ahlers, K. Pätzold und M. Seidel, "Praxisinformation P 2007 / 13 Gastransport / Betriebswirtschaft, Abwicklung von Standardlastprofilen", Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft (BGW), Techn. Ber., 2007.
- [50] B. Geiger und M. Hellwig, "Entwicklung von Lastprofilen für die Gaswirtschaft im Auftrag des Bundesverbandes der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft e.V. und des Verbandes kommunaler Unternehmen e.V. Haushalte", *Energiewirtschaft und Anwendungstechnik*, Lehrstuhl im Institut für Energietechnik, Technische Universität München, München, Forschungsber., Nov. 2002.
- [51] M. Hellwig, "Entwicklung und Anwendung parametrisierter Standard-Lastprofile", Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München, 15. Sep. 2003.
- [52] S. von Roon, T. Gobmaier, K. Wachinger und M. Hinterstocker, "Statusbericht zum Standardlastprofilverfahren Gas", Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH (FfE), Forschungsber., Nov. 2014.
- [53] M. Hinterstocker, B. Eberl und S. von Roon, "Weiterentwicklung des Standardlastprofilverfahrens Gas", Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH (FfE), Forschungsber., Juli 2015.
- [54] Deutscher Wetterdienst. (2017). DATENSATZBESCHREIBUNG Historische tägliche Stationsbeobachtungen (Temperatur, Druck, Niederschlag, Sonnenscheindauer, etc.) für Deutschland, Adresse: ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/historical/BESCHREIBUNG_obsgermany_climate_daily_kl_historical_de.pdf (besucht am 18.08.2017).
- [55] VDI-Richtlinie 3807 Blatt 1, *Energieverbrauchskennwerte für Gebäude - Grundlagen*, Düsseldorf, Juni 1994.
- [56] Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013 Teil I Nr. 67, "Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung, v. 18.11.2013", 21. Nov. 2013.
- [57] Environmental Systems Research Institute, Inc., "ESRI Shapefile Technical Description, An ESRI White Paper—July 1998", Techn. Ber., 1998.
- [58] D. Hu, S. Ma, F. Guo, G. Lu und J. Liu, "Describing data formats of geographical models", *Environmental Earth Sciences*, Jg. 74, Nr. 10, S. 7101–7115, Nov. 2015, ISSN: 1866-6299. DOI: [10.1007/s12665-015-4737-4](https://doi.org/10.1007/s12665-015-4737-4). Adresse: <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4737-4>.

- [59] P. H. Dana, "The MapInfo Interchange File (MIF) Format Specification", MapInfo Corporation Troy, New York, Techn. Ber., Okt. 1999.
- [60] H. A. Stan, "ASCII: A character study.", *Computers in Libraries*, Jg. 14, Nr. 9, S. 26, 1994, ISSN: 10417915.
- [61] R. Andre. (6. Mai 2009). Using GDAL / OGR for Data Processing and Analysis, Washington GIS Conferences 2009, OSGeo, Adresse: http://www.waurisa.org/conferences/2009/presentations/Weds/OpenSource_Weds_Andre_CUGOS.pdf (besucht am 08.08.2017).
- [62] W. Behrens u. a., *Technisches Handbuch Fernwärme*, 2. Auflage. Frankfurt am Main: AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Nov. 2009, ISBN: 3-89999-020-X.
- [63] B. Glück, *Bausteine der Heizungstechnik - Berechnung Software, Wärmeübertragung - Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren*, 2. Auflage. Verlag für Bauwesen GmbH, 1990, 439 S., ISBN: 3-345-00515-8.
- [64] K. Elgeti, "Wärmeverlust von Wänden und Rohrleitungen", in *VDI-Wärmeatlas* -, VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC), Hrsg., 10. Auflage, Wiesbaden: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, ISBN: 3-540-25504-4.
- [65] H. Netz, *Betriebstaschenbuch Wärme: Beschreibungen, Definitionen, Richtlinien, Formeln, Tabellen, Diagramme u. Abbildungen f. alle Bereiche d. Wärmetechnik*. Gräffelfing bei München: Technischer Verlag Resch, 1974.
- [66] K.-H. Dahlem, *Band1: Der Einfluß des Grundwassers auf den Wärmeverlust erdreichberührter Bauteile*. Universitätsbibliothek Kaiserslautern, Prof. Dr. rer. nat. Hermann Heinrich, Nov. 2000, ISBN: 3-925178-49-X.
- [67] R. Ondrak, F. Wenderoth, M. Scheck und U. Bayer, "Integrated geothermal modeling on different scales in the Northeast German basin", *Geologische Rundschau*, Jg. 87, Nr. 1, S. 32–42, Mai 1998, ISSN: 1432-1149. DOI: 10.1007/s005310050187. Adresse: <https://doi.org/10.1007/s005310050187>.
- [68] Deutscher Wetterdienst. (2018). Klimadaten des Climate Data Centers, Adresse: ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/historical/ (besucht am 04.01.2018).
- [69] Isoplus, "Planungshandbuch", Isoplus, Techn. Ber., Version 6, 30. Dez. 2016.
- [70] M. Manderfeld, "Leitungsgebundene Wärmeversorgung im ländlichen Raum - Handbuch zur Entscheidungsunterstützung - Fernwärme in der Fläche", Fernwärmeversorgung Niederhein GmbH, Dinslaken, 15. Juli 2008.
- [71] Statistisches Bundesamt, "Index der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Inlandsabsatz) nach dem Güterverzeichnis für Produktionsstatistiken, Ausgabe 2009 (GP 2009) - Lange Reihen der Fachserie 17, Reihe 2 von Januar 2000 bis September 2017 -", Destatis, Artikelnummer: 5612401171095, 20. Okt. 2017.

- [72] —, “Fachserie 17 Reihe 4 - Preisindizes für die Bauwirtschaft - August 2017 (3. Vierteljahresausgabe)”, Destatis, Artikelnummer: 2170400173234, 10. Okt. 2017, S. 25–26.
- [73] QGIS.ORG Verein, *QGIS*, Version 3.8.1-Zanzibar, 2020. Adresse: <https://www.qgis.org> (besucht am 25. 11. 2020).
- [74] J. Zeisberger, “Beitrag zur energieeffizienten Trinkwassererwärmung. Messtechnische Untersuchungen zur Bewertung und Optimierung von Trinkwassererwärmungssystemen”, Diss., Technische Universität München, Fakultät für Architektur, München, 2017.
- [75] H. Böhnisch, M. Nast und A. Stuible, “Entwicklung und Umsetzung eines Kommunikationskonzepts als Anschlag zur Nahwärmeversorgung in Landgemeinden. EUKOM Endbericht LIFE 98 ENV /D/ 000501”, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, März 2001.
- [76] U. Ramsaier, “Planung und Ausführung effizienter Wärmenetze am Beispiel Hemmingen-Schieberdingen”, präsentiert auf der Fachtagung: Nahwärme kompakt - Effiziente Wärmenetze, Karlsruhe, 29. Sep. 2016.
- [77] “Fernwärmeversorgung Technische Vorschriften Hochtemperatur”, Energie Wasser Bern, Techn. Ber., Juli 2017.
- [78] W. Lutsch, H. Neuffer, F.-G. Witterhold, W. Pfaffenberger, T. Pfeifer, T. Sander, J. Zschernig, M. Klobasa, P. Radgen, C. Schmid, M. Bartels, C. Beier und C. Dötsch, *Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und regenerativer Energien : Kurztitel: Pluralistische Wärmeversorgung ; AGFW-Hauptstudie - zweiter Bearbeitungsabschnitt. Band 2 Technikentwicklung und -bewertung, Teil 1: Analyse und Beschreibung der Techniklinien und ihrer Entwicklung bis 2020*. Frankfurt: Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft (AGFW), März 2004, ISBN: 3-89999-005-6.
- [79] A. Babusch, T. Ebert, K.-H. König, T. Makoschey, A. Millies, M. Oraschewski und B. Rudolph, “Pumpenfibel - Grundlagen der Pumpentechnik”, WILLO SE, Dortmund, Version 6. überarbeitete und aktualisierte Auflage, 2016.
- [80] T. Athan u. a., *QGIS User Guide, Release 2.14*. QGIS Project, 8. Aug. 2017.
- [81] B. Zeichner, K. Jagnow und D. Wolff, “Nahwärmenetzkarten Neuerkerode; Bericht im Rahmen des DBU-Umsetzungsprojektes Neuerkerode”, Wolfenbüttel/ Braunschweig, 2011, Adresse: http://www.delta-q.de/cms/de/downloads/20_Bericht_Nahwaermenetzkarten.pdf (besucht am 10. 11. 2020).
- [82] K. Jagnow und D. Wolff, “Abschlussbericht 02: Mediengrunddaten; Bericht im Rahmen des DBU-Grundlagenprojektes Neuerkerode”, Wolfenbüttel/ Braunschweig, 2008. Adresse: https://www.delta-q.de/export/sites/default/de/downloads/02_Abschlussbericht_2008_Mediengrunddaten.pdf (besucht am 10. 11. 2020).

- [83] N. Li, K. Jagnow und D. Wolff, "Hydraulische Optimierung des Wärmenetzes; Bericht im Rahmen des DBU-Umsetzungsprojektes Neuerkerode", 2012, Adresse: https://www.delta-q.de/export/sites/default/de/downloads/21_Bericht_Netzhydraulik.pdf (besucht am 01.11.2020).
- [84] OpenStreetMap Mitwirkende. (2020). Kartenausschnitt Neueckerode, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/52.2123/10.6545> (besucht am 07.11.2020).
- [85] TUBS. (2009). Karte: Lage von Region Hannover in Niedersachsen, Deutschland. CC BY-SA 1.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/deed.de>, Adresse: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Locator_map_H_in_Lower_Saxony.svg?uselang=de (besucht am 07.11.2020).
- [86] K. Jagnow, "Temperaturmessungen in der Nahwärme; Bericht im Rahmen des DBU-Umsetzungsprojektes Neuerkerode", Wolfenbüttel/ Braunschweig, 2009, Adresse: http://www.delta-q.de/cms/de/downloads/09_Bericht_Nahwaermetemperaturen.pdf (besucht am 10.11.2020).
- [87] R. Wirdemann, A. Hübener, K. Jagnow und D. Wolff, "Abschlussbericht05: Nahwärmeerzeugung und Netz; Bericht im Rahmen des DBU-Grundlagenprojektes Neuerkerode", Wolfenbüttel/ Braunschweig, 2008. Adresse: http://www.delta-q.de/cms/de/downloads/05_Abschlussbericht_2008_Nahwaerme.pdf (besucht am 10.11.2020).
- [88] Bundesamt für Statistik (Schweiz), "Anzahl Der Gebäude Mit Wohnnutzung In Der Schweiz Nach Geschosszahl Im Jahr 2017.", Statista GmbH, 2018. Adresse: <https://de.statista.com/bibproxy.fh-kufstein.ac.at/statistik/daten/studie/469993/umfrage/gebaeude-in-der-schweiz-nach-geschossanzahl/> (besucht am 02.11.2018).
- [89] Verband deutscher Pfandbriefbanken, "Durchschnittliche Wohnfläche Von Eigenheimen In Deutschland Nach Siedlungsstrukturellen Kreistypen Im Jahr 2009 (In Quadratmetern)", Statista GmbH, 1. Sep. 2009. Adresse: <https://de.statista.com/bibproxy.fh-kufstein.ac.at/statistik/daten/studie/73280/umfrage/wohnflaeche---durchschnitt-nach-kreistypen-in-deutschland-2009/> (besucht am 22.07.2019).
- [90] —, "Grundstücksfläche - Durchschnitt In Deutschland Im Jahr 2009 Nach Kreistypen (in m²)", Statista GmbH, 31. Okt. 2009. Adresse: <https://de.statista.com/bibproxy.fh-kufstein.ac.at/statistik/daten/studie/73279/umfrage/grundstuecksflaeche---durchschnitt-nach-kreistypen-2009/> (besucht am 11.01.2021).
- [91] FGSV Verlag - Der Verlag der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen RASt 06*, 15. Dez. 2008.

- [92] L. Fahrmeir, C. Heumann, R. Künstler, I. Pigeot und G. Tutz, *Statistik: Der Weg zur Datenanalyse*, 8. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2016, ISBN: 978-3-662-50371-3.
- [93] RStudio, Inc., *RStudio*, Version 1.1.447, 2020. Adresse: <https://rstudio.com> (besucht am 19.01.2020).
- [94] L. Fahrmeir, T. Kneib und S. Lang, *Regression: Modelle, Methoden und Anwendungen*, 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009, ISBN: 978-3-642-01836-7.
- [95] Statistisches Bundesamt, "Fachserie 17 Reihe 5 - Preise - Kaufwerte für Bauland 2018", Destatis, Artikelnummer: 2170500187004, 3. Sep. 2019.
- [96] —, "Umweltökonomische Gesamtrechnungen - Private Haushalte und Umwelte - Berichtszeitraum 2000 - 2018", Destatis, Artikelnummer: 5851319187004, 4. Sep. 2020, S. 25–26.
- [97] D. Ohde. (2020). Geodatenportal, Fachbereich Geodaten und Verkehrsanlagen, Fachdienst Geodaten, Adresse: <https://geo.osnabrueck.de/stadtplan/> (besucht am 05.04.2020).
- [98] S. Thalmann, T. Nussbaumer, J. Good und A. Jenni, "Analyse und Optimierung von Fernwärmenetzen - IST-Analyse von Fernwärmenetzen und Bewertungstool zur Netzoptimierung", Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK Bundesamt für Energie BFE, Zürich, 21. Nov. 2013.
- [99] D. Wolff und K. Jagnow, "Überlegungen zu Einsatzgrenzen und zur Gestaltung einer zukünftigen Fern- und Nahwärmeversorgung", Wolfenbüttel/Braunschweig, 2011. Adresse: <http://www.delta-q.de/export/sites/default/de/downloads/fernwaermestudie.pdf> (besucht am 10.11.2020).
- [100] H.-J. Bartsch, *Taschenbuch mathematischer Formeln*, 18. verbesserte Auflage. München Wien: Carl Hanser Verlag, 1998, ISBN: 3-446-19396-0.
- [101] G. Groschke, "1.2 Bilder elementarer Funktionen", in *Bronstein-Semendjajew - Taschenbuch der Mathematik*, G. Groschke, V. Ziegler und D. Ziegler, Hrsg., Moskau und Leipzig: Verlag Nauka und BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1985.
- [102] T. Nussbaumer, S. Thalmann, A. Jenni und J. Ködel, *Planungshandbuch Fernwärme*. Bern: EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE, 2018, ISBN: 3-908705-30-4.
- [103] VDI-Richtlinie 2067 Blatt 2, *Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen-Raumheizung*, Düsseldorf, 1993.
- [104] W. Winter, T. Haslauer und I. Obernberger, "Untersuchungen der Gleichzeitigkeit in kleinen und mittleren Nahwärmenetzen", *Euroheat & power*, Jg. 9, Nr. 10, 2001, ISSN: 0949-166X.
- [105] H. Schweichler, "Simulationsgestützte Untersuchung von Optimierungsmöglichkeiten für Nahwärmenetze", Magisterarb., Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2018. Adresse: https://reposit.haw-hamburg.de/bitstream/20.500.12738/8444/1/180507_Masterarbeit_Schweichler.pdf (besucht am 13.04.2020).

- [106] OpenStreetMap Foundation, Hrsg. (2019). Open Data Commons Open Database Lizenz (ODbL), Adresse: <https://www.openstreetmap.org> (besucht am 31. 08. 2019).
- [107] M. Nast, "Verluste in Wärmenetzen - Erfahrungen und Spannweiten", *Wärmewende-Info* 23, 2015.
- [108] J. Klönk, "Definition and evaluation of parameters allowing for a sustainable district heating network operation", Magisterarb., Aalborg University, 2012. Adresse: https://projekter.aau.dk/projekter/files/72426093/08.01._Masters_Thesis_Jannis_Klonk.pdf (besucht am 11. 10. 2020).
- [109] D. Wolff und K. Jagnow, "Nah- und Fernwärme: Aus- oder Rückbau?", *TGA Fachplaner Ausgabe 09-2011*, 2011.
- [110] R. Croy und H. Wirth, "4. Zwischenbericht für das Projekt Solaranlage im Wohngebiet ehemaliger Schlachthof in Speyer, Berichtszeitraum: 4.7.2005 bis 30.9.2009", ZfS – Rationelle Energietechnik GmbH, Hilden, Forschungsber. Förderkennzeichen 032 9604 B, 2009.
- [111] VDI-Richtlinie 2067 Blatt 1, *Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung*, 2012.
- [112] TUBS. (2010). Karte: München Basiskarte grau. CC BY-SA 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/deed.de>, Adresse: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Munich_Subdivisions_grey.svg (besucht am 22. 11. 2020).
- [113] GeoPortal München. (20. Juli 2011). Vorhabenbezogener Bebauungsplan mit Grünordnung Nr. 1890 der Landeshauptstadt München, Adresse: http://www.muenchen.info/plan/bebauungsplan/p_8730_1890.pdf (besucht am 21. 11. 2020).
- [114] —, (23. Juli 2014). Bebauungsplan mit Grünordnung Nr. 1971 der Landeshauptstadt München, Adresse: http://www.muenchen.info/plan/bebauungsplan/p_8852_1971.pdf (besucht am 20. 11. 2020).
- [115] Musterbauordnung - MBO -, "Fassung November 2002 zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 27.09.2019", *Deutsches Institut für Bautechnik*, 2019. Adresse: https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Rechtsgrundlagen/MBO_2019.pdf (besucht am 27. 11. 2020).
- [116] GeoPortal München. (11. Jan. 2012). Bebauungsplan mit Grünordnung Nr. 1987 der Landeshauptstadt München, Adresse: http://www.muenchen.info/plan/bebauungsplan/p_8811_1987.pdf (besucht am 21. 11. 2020).
- [117] R. Henger, M. Hude, B. Seipelt, A. Toschka, H. Scheunemann, M. Barthauer und C. Giesemann, "dena-Studie: Büroimmobilien - Energetischer Zustand und Anreize zur Steigerung der Energieeffizienz", Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, 2017. Adresse: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9196_Bueroimmobilien_Energetischer_Zustand_Anreize_Steigerung_Energieeffizienz.pdf (besucht am 24. 11. 2020).

- [118] U. Bogenstätter, "Flächen- und Raumkennzahlen - Synopse", Institute for Building Operations Research at Nürtingen-Geislingen University, 2007. Adresse: <http://www.ifbor.eu/resources/ifBOR+FRZ+2007-10+S1-10.pdf> (besucht am 24.11.2020).
- [119] J. Kislinger, T. Zelger und J. Obermayer, "Passivhauskindergarten mit heilpädagogischer Integrationsgruppe - Berichte aus Energie- und Umweltforschung 8/2003", Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2003.
- [120] L. Karopka, A. Klöffel, I. Therburg, R. Kopetzky, T. Weber und S. Kunkel, "BBSR-Online-Publikation, Nr. 09/2009: Benchmarks für die Energieeffizienz von Nichtwohngebäuden - Vergleichswerte für Energieausweise", Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Berlin Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn, 2009.
- [121] GreenDelta GmbH. (2020). SOPHENA – Software zur Planung von Heizwerken und Nahwärmenetzen, C.A.R.M.E.N. e.V., Adresse: <https://www.carmen-ev.de/service/sophena/> (besucht am 23.10.2020).
- [122] N. Réhault, D. Kalz, F. Ohr, S. Zehnle, B. Haase, G. Böhme, A. Göbbels und J. Lu, "AL-DI 2010 – Hocheffizienter Supermarkt mit geothermiegestütztem CO₂-Kälteverbund - Abschlussbericht 2013", Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Bereich Thermische Anlagen und Gebäudetechnik | Abteilung Solares Bauen, 2014.
- [123] W. Nowak und J. Arthkamp, "BHKW-Grundlagen", Bestellnummer: 06 06 10, ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., Berlin, 2010.
- [124] S. Ruhnau, P. Fay, J. Kahlert, W. Nowak und J. Arthkamp, "BHKW-Kenndaten 2011, Module, Anbieter, Kosten", Bestellnummer: 050711, ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., Stadt Frankfurt am Main, Berlin, Frankfurt am Main, 2011.
- [125] Statistisches Bundesamt, "Index der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Inlandsabsatz) - Lange Reihen der Fachserie 17 Reihe 2 von Januar 2005 bis Oktober 2020", Destatis, Artikelnummer: 5612401201104, 20. Nov. 2020.
- [126] K. Lucas, Gebhardt, H. Kohl und T. Steinrötter, "Ableitung von Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energienutzung", Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA), Duisburg-Rheinhausen, 2002.
- [127] Umweltbundesamt. (2020). Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente (Probas), PipelineBiomethan-2Kultur-DE-2020, Adresse: <https://probas.umweltbundesamt.de/php/web2pdf.php?id=%7B3092A1EC-0E3C-44A6-8169-85E641B31B08%7D> (besucht am 29.12.2020).
- [128] K. Völler, "dena-Analyse - Branchenbarometer Biomethan 2020", Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) - Nachhaltige Mobilität & alternative Energieträger, Berlin, 2020.

- [129] Umweltbundesamt. (2020). Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente (Probas), Netz-el-DE-lokal-HH/KV-2020, Adresse: <https://probas.umweltbundesamt.de/php/web2pdf.php?id=%7BB9D03601-578D-4D4A-A4EE-F512FB11A751%7D> (besucht am 29. 12. 2020).
- [130] Bundesgesetzblatt Jahrgang 2014 Teil I Nr. 33, "Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 21. Dezember 2020 (BGBl. I S. 3138) geändert worden ist", 21. Dez. 2020.
- [131] Bundesnetzagentur. (2020). Ergebnisse der Ausschreibungsrunden für Biomasse-Anlagen 2017 bis 2020, Adresse: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Statistiken/Statistik_Biomasse.xlsx?__blob=publicationFile&v=6 (besucht am 29. 12. 2020).
- [132] M. Platt, S. Exner und R. Bracke, "Studie: Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes - Bestandsaufnahme und Trends", GeothermieZentrum Bochum, Hochschule Bochum - Bochum University of Applied Sciences, 2010.
- [133] M. Sabel, "Kundenratgeber Erdwärme", Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V., Berlin, 2020.
- [134] J. Lambauer, U. Fahl, M. Ohl, M. Blesl und A. Voß, "Industrielle Großwärmepumpen - Potenziale, Hemmnisse und Best-Practice Beispiele", Universität Stuttgart Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Forschungsber., 2008.
- [135] E. Dünnhoff, "Nachtspeicherheizungen und elektrische Direktheizungen - Ergebnisse von drei Gruppendiskussionen und einer bundesweiten Verbraucherbefragung", Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz e.V., Mainz, 2017.
- [136] Statistisches Bundesamt. (2020). Ergebnis 61243-0001: Strompreise für Haushalte: Deutschland, Halbjahre, Jahresverbrauchsklassen, Preisarten, Adresse: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=previous&levelindex=1&step=1&titel=Ergebnis&levelid=1609251251050> (besucht am 29. 12. 2020).
- [137] U. Leibfried, A. Wagner und A. Abdul-Zahra. (2017). SOLINK PVT - Energieversorgungssystem für Wärmepumpen, 27. Symposium Thermische Solarenergie, OTTI, Bad Staffelstein, Adresse: https://www.consolar.de/fileadmin/Consolar/user/downloads/Presse/2018/SOLINK-Ankuendigung-Serienstart/OTTI_2017_SOLINK_Poster.pdf (besucht am 02. 01. 2021).
- [138] Stadtwerke München. (2020). Preisblatt Netzanschlüsse der SWM Versorgungs GmbH gültig ab 1. Juli 2020, Adresse: <https://www.swm.de/dam/doc/kundenservice/netzanschluss/preise-netzanschluesse> (besucht am 28. 12. 2020).
- [139] —, (2020). M-Fernwärme - Veröffentlichung PEF und THG, Adresse: <https://www.swm.de/geschaeftskunden/fernwaerme> (besucht am 29. 12. 2020).

- [140] —, (2020). Ergänzende Bedingungen der SWM Versorgungs GmbH (SWM) für die Versorgung mit Fernwärme im Versorgungsgebiet München Stadt, Martinsried, Unterföhring - Anlage zur AVBFernwärmeV -, Adresse: <https://www.swm.de/dam/doc/geschaeftskunden/fernwaerme/ergaenzende-bedingungen-muenchen-stadt.pdf> (besucht am 27. 12. 2020).
- [141] Verband deutscher Pfandbriefbanken, "Effektivzins für Hypothekendarlehen in Deutschland in den Jahren von 1994 bis 2018", Statista GmbH, 2020. Adresse: <https://de.statista.com/bibproxy.fh-kufstein.ac.at/statistik/daten/studie/155740/umfrage/entwicklung-der-hypothekenzinsen-seit-1996/> (besucht am 11.01.2021).
- [142] Statistisches Bundesamt, "Preise - Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihen von Januar 2005 bis November 2020 -", Destatis, Artikelnummer: 5619001201114, 23. Dez. 2020.
- [143] M. Altrock, L. Baur, J. Bennewitz, A. Ebell, Z. Elek, L. Gottschalk, U. Holzhammer, R. Kahn, J. Krassowski, T. Krause, S. Mahlow, S. Reichelt, T. Reischke, K. Spahn und P. Zumdick, "Leitfaden Biomethan BHKW - direkt. Eine Handreichung für mit Biomethan betriebene Blockheizkraftwerke gemäß EEG 2012 mit Schwerpunkt Direktvermarktung und der bedarfsgerechten Erzeugung von Strom aus Biomethan.", Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) Regenerative Energien, Berlin, 2013.
- [144] T. Reinholz und C. Kühnel, "dena-Kurzanalyse - Vermiedene Netzkosten - Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Einspeisung von erneuerbaren Gasen", Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, 2018.
- [145] K. Völler und T. Reinholz, "dena-Analyse - Branchenbarometer Biomethan 2019", Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) - Erneuerbare Energien und Mobilität, Berlin, 2019.
- [146] Statistisches Bundesamt. (2020). Ergebnis 61311-0005: Erzeugerpreisindex für Dienstleistungen: Deutschland, Jahre, Dienstleistungsart, Adresse: <https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=61311-0005> (besucht am 30. 12. 2020).
- [147] OpenStreetMap Mitwirkende. (2019). Kartenausschnitt Zum Himmelreich, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/52.2418/8.0680> (besucht am 02. 08. 2019).
- [148] —, (2020). Kartenausschnitt Rheiner Landstraße, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/52.2657/7.9714> (besucht am 02. 08. 2019).
- [149] —, (2020). Kartenausschnitt Portweg, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>),

Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=17/52.29368/7.98172> (besucht am 04.04.2020).

- [150] —, (2020). Kartenausschnitt Preußenweg, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/52.2827/7.9434> (besucht am 06.04.2020).
- [151] —, (2020). Kartenausschnitt Bramkamp, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/52.2928/7.9502> (besucht am 04.04.2020).
- [152] —, (2019). Kartenausschnitt Fürstenauer Weg, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/52.3211/7.9976> (besucht am 02.08.2019).
- [153] —, (2020). Kartenausschnitt Pyer Kirchweg, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/52.3294/7.9933> (besucht am 04.04.2020).
- [154] —, (2020). Kartenausschnitt Gretescher Weg, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/52.2813/8.0984> (besucht am 04.04.2020).
- [155] —, (2020). Kartenausschnitt Strothmannsweg, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/52.2822/8.1105> (besucht am 04.04.2020).
- [156] —, (2019). Kartenausschnitt Hauptmannstraße, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=17/52.26566/8.15137> (besucht am 02.08.2019).
- [157] —, (2020). Kartenausschnitt Schledehauser Weg, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=17/52.27867/8.14609> (besucht am 04.04.2020).
- [158] —, (2019). Kartenausschnitt Sandforter Straße, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=17/52.26416/8.11104> (besucht am 02.08.2019).

- [159] —, (2020). Kartenausschnitt Kreuzhügel, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=17/52.26938/8.10765> (besucht am 05. 04. 2020).
- [160] —, (2020). Kartenausschnitt Ansgarstraße, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/52.2474/8.0590> (besucht am 05. 04. 2020).
- [161] —, (2019). Kartenausschnitt Auf der Heide, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/52.2710/8.0932> (besucht am 02. 08. 2019).
- [162] —, (2020). Kartenausschnitt Wersener Landstraße, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/52.2998/7.9744> (besucht am 04. 04. 2020).
- [163] —, (2020). Kartenausschnitt Hannoversche Straße, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=15/52.2625/8.0760> (besucht am 05. 04. 2020).
- [164] —, (2020). Kartenausschnitt Hasestraße, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/52.2768/8.0473> (besucht am 05. 04. 2020).
- [165] —, (2020). Kartenausschnitt Freiheitsweg, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=15/52.2909/8.0857> (besucht am 05. 04. 2020).
- [166] —, (2020). Kartenausschnitt Goethering, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/52.2743/8.0548> (besucht am 05. 04. 2020).
- [167] —, (2020). Kartenausschnitt Süsterstraße, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/52.2700/8.0503> (besucht am 05. 04. 2020).
- [168] —, (2020). Kartenausschnitt Bohmter Straße, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=15/52.2824/8.0575> (besucht am 05. 04. 2020).

- [169] —, (2020). Kartenausschnitt Atterstraße, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=17/52.30471/7.99459> (besucht am 05.04.2020).
- [170] —, (2020). Kartenausschnitt Buchholtzstraße, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/52.3068/7.9964> (besucht am 05.04.2020).
- [171] —, (2020). Kartenausschnitt Piesberger Straße, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/52.2996/8.0097> (besucht am 05.04.2020).
- [172] —, (2020). Kartenausschnitt Klöcknerstraße, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/52.3042/8.0092> (besucht am 05.04.2020).
- [173] —, (2020). Kartenausschnitt Pagenstecherstraße, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=15/52.2900/8.0258> (besucht am 05.04.2020).
- [174] —, (2020). Kartenausschnitt Elbestraße, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=14/52.3013/8.0212> (besucht am 05.04.2020).
- [175] —, (2019). Kartenausschnitt Rheinstraße, Osnabrück, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/52.2904/8.0330> (besucht am 02.08.2019).
- [176] —, (2020). Kartenausschnitt Cosimastraße, München, Karte hergestellt aus OpenStreetMap Daten, Open Database License ODbL (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/>), Adresse: <https://www.openstreetmap.org/#map=17/48.16124/11.63089> (besucht am 18.10.2020).

Anhang

A. Python Code

Python Skript zur Variation der synthetischen Siedlung

```
# -*- coding: utf-8 -*-
#!/usr/bin/env python3

A0=15600
LH0=135
LS0=78
LAI=9
LAs=5
LSHD=20.5
IstDaten=[]

for f in range(50,301,1):
    for m in range(12,21,1): #steht fuer n
        for x in range(1,31):
            fA=f/100.0
            if fA<1:
                n=x*m
                A=int(fA*A0*x)
                L=int((2*(fA**0.5)*LH0*x + (fA**0.5)*LS0*x
                    + n*fA*LAI) + (fA**0.5)*LSHD*(x-1))
                An=A*n
            else:
                n=x*m
                A=int(fA*A0*x)
                L=int((2*(fA**0.5)*LH0*x + (fA**0.5)*LS0*x + n*LAI)
                    + (fA**0.5)*LSHD*(x-1))
                An=A*n
            IstDaten.append([fA,n,x,A,L,An])

datei = open("Ergebnis.csv", "w")
datei.write("fA;n;x;A;L;An" + "\n")
for zeile in IstDaten:
    datei.write(str(zeile[0]) + ";" + str(zeile[1]) + ";" + str(zeile[2])
        + ";" + str(zeile[3]) + ";" + str(zeile[4]) + ";" + str(zeile[5])
        + "\n")
datei.close()
```

Python Skript zur Berechnung der Wärmenetzverluste

```
#!/usr/bin/python3
# Import the modules
import sys
import random
import numpy as np

A = float(input('Siedlungsflaeche_m2:_'))
n = float(input('Gebaeudeanzahl:_'))
Qab = float(input('gelieferte_Waermemenge_MMh/a:_'))

def calc_length(A, n):
    a = A*n
    return -1.784*(10**2)*np.log(a+np.sqrt((a**2)+1)) \
        + 1.171*np.sqrt(a)-9.185*10**(-6)*a+2.371*10**3

def calc_loss(A, L, Qab):
    b=(120*Qab/(A))*(Qab/L)
    if b>60:
        b=60
    A = -1.067*(10**(-6))*(b**3)
    B = +1.327*(10**(-4))*(b**2)
    C = -5.289*(10**(-3))*b
    D = ((1/(np.exp(2*b)-1))*5.379*(10**(-1)))
    E = np.log(b)*(-1.719*(10**(-2)))+1.901*(10**(-1))
    print("A" + str(A) + "B" + str(B) + "C" + str(C) + "D" + str(D) + "E" + str(E))
    return (A+B+C+D+E)*Qab

L = calc_length(A, n)
QV = calc_loss(A, L, Qab)
qzu = QV/(Qab+QV)

print("Laenge_Waermenetz_(trm):_" + str(int(L)))
print("Netzverluste_absolut_(MMh/a):_" + str(int(QV)))
print("spezifische_Netzverluste_(%):_" + str((qzu*100)))
```

Python Skript zur Berechnung der Wärmenetzverluste inklusive Erweiterung

```
#!/usr/bin/python3
# Import the modules
import sys
import random
import numpy as np

A = float(input('Siedlungsflaeche_m2:_'))
n = float(input('Gebaudeanzahl:_'))
Qab = float(input('gelieferte_Waermemenge_MMh/a:_'))
VL = float(input('durchschnittliche_Vorlauftemperatur_in_Grad_Celsius:_'))
RL = float(input('durchschnittliche_Ruecklauftemperatur_in_Grad_Celsius:_'))

def calc_length(A, n):
    a = A*n
    return -1.784*(10**2)*np.log(a+np.sqrt((a**2)+1)) \
        + 1.171*np.sqrt(a)-9.185*10**(-6)*a+2.371*10**3

def calc_loss(A, L, Qab):
    b=(120*Qab/(A))*(Qab/L)
    if b>60:
        b=60
    A = -1.067*(10**(-6))*(b**3)
    B = +1.327*(10**(-4))*(b**2)
    C = -5.289*(10**(-3))*b
    D = ((1/(np.exp(2*b)-1))*5.379*(10**(-1)))
    E = np.log(b)*(-1.719*(10**(-2)))+1.901*(10**(-1))
    return (A+B+C+D+E)*Qab

if Qab < 10000:
    fVLRL = (75-10)+(51-10)
elif Qab < 100000:
    fVLRL = (88-10)+(55-10)
else:
    fVLRL = (118-10)+(56-10)

L = calc_length(A, n)
QV8555 = calc_loss(A, L, Qab)
QVxy = (QV8555/fVLRL)*((VL-10)+(RL-10))

qzu = QVxy/(Qab+QVxy)
print("Laenge_Waermenetz_(trm):_" + str(int(L)))
```

```
print("Netzverluste_absolut_(MWh/a):_" + str(int(QVxy)))  
print("spezifische_Netzverluste_(%):_" + str((qzu*100)))
```

B. Karten der Testprojekte aus Osnabrück

Die dargestellten Karten basieren auf den Daten von Openstreetmap (OSM) und sind mit der Software QGIS erstellt. In der Karte ist das zu betrachtende Gebiet umrandet und die gemessene Fläche in m² eingetragen.

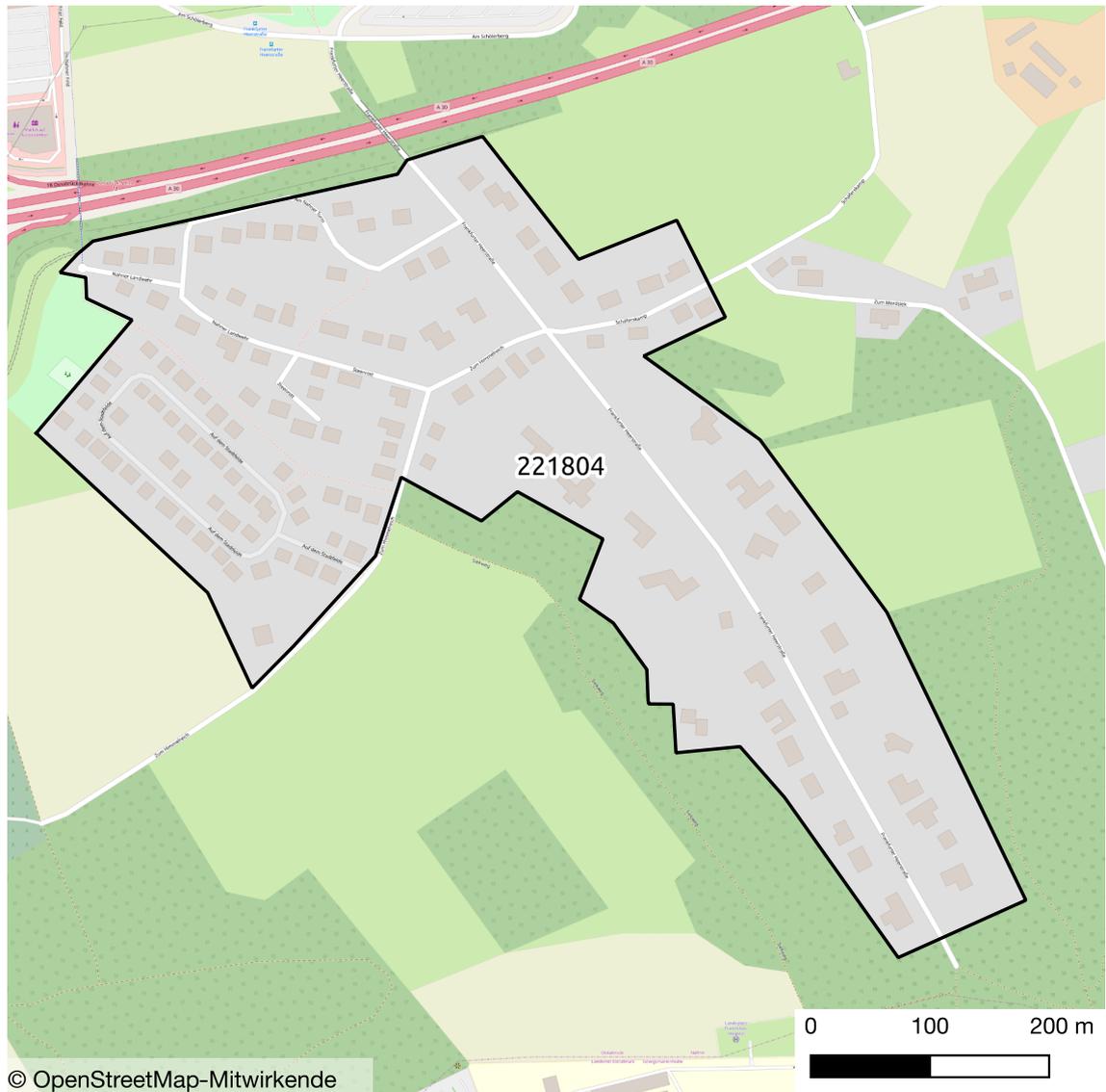


Abbildung 155 Flächenermittlung Osnabrück Zum Himmelreich (Quelle: Karte [147])

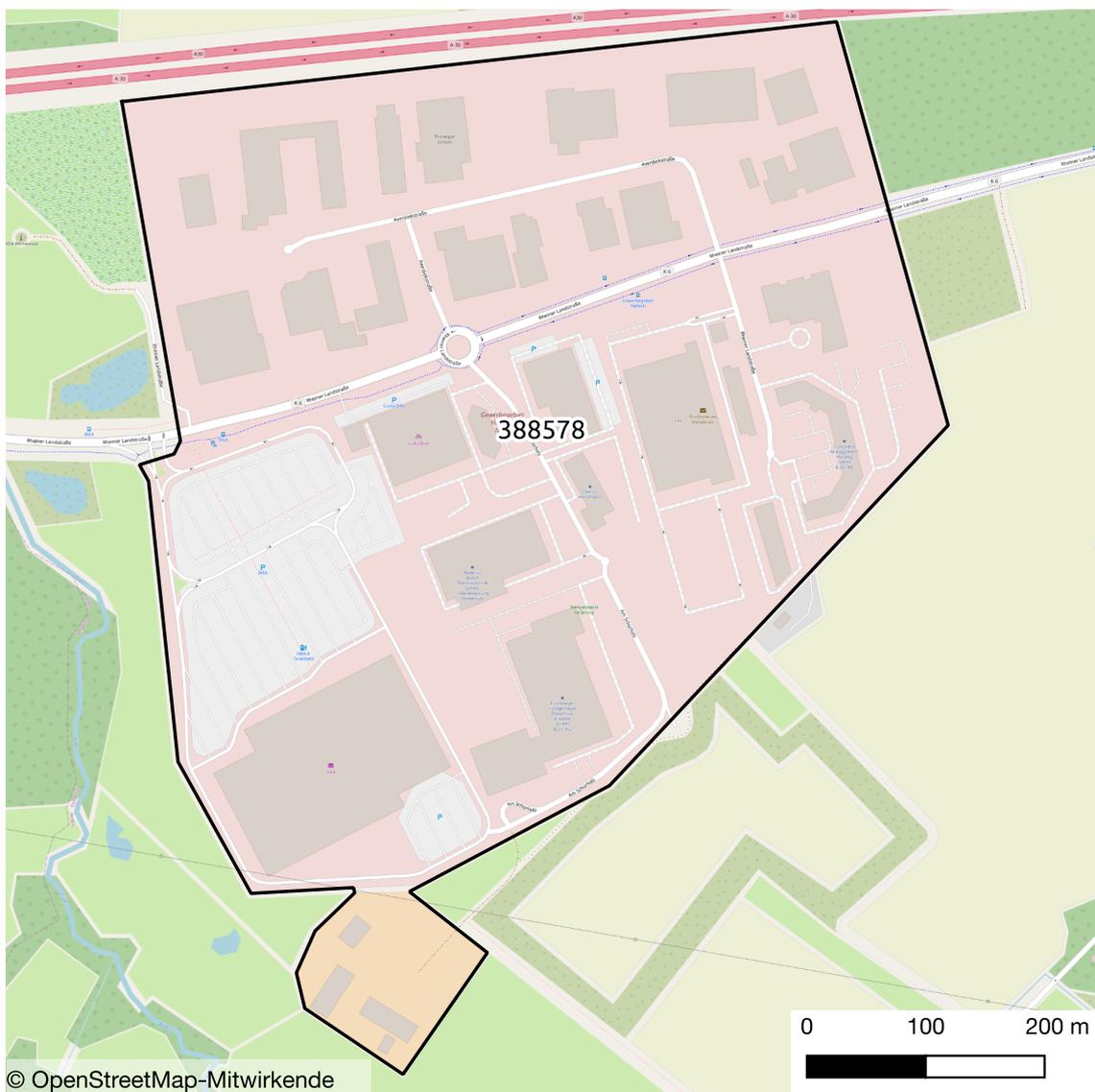


Abbildung 156 Flächenermittlung Osnabrück Rheinischer Landstraße (Quelle: Karte [148])

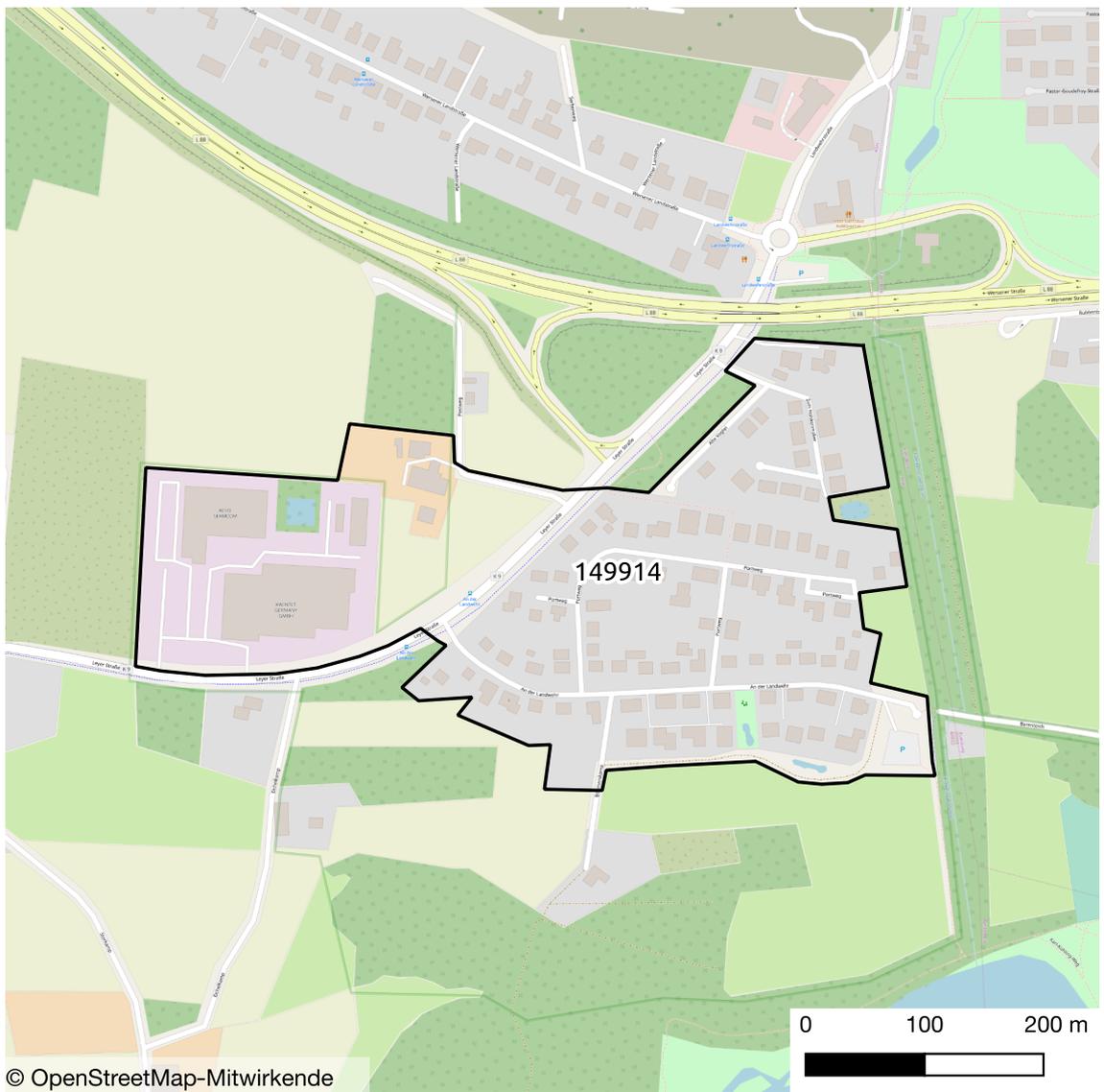


Abbildung 157 Flächenermittlung Osnabrück Portweg (Quelle: Karte [149])

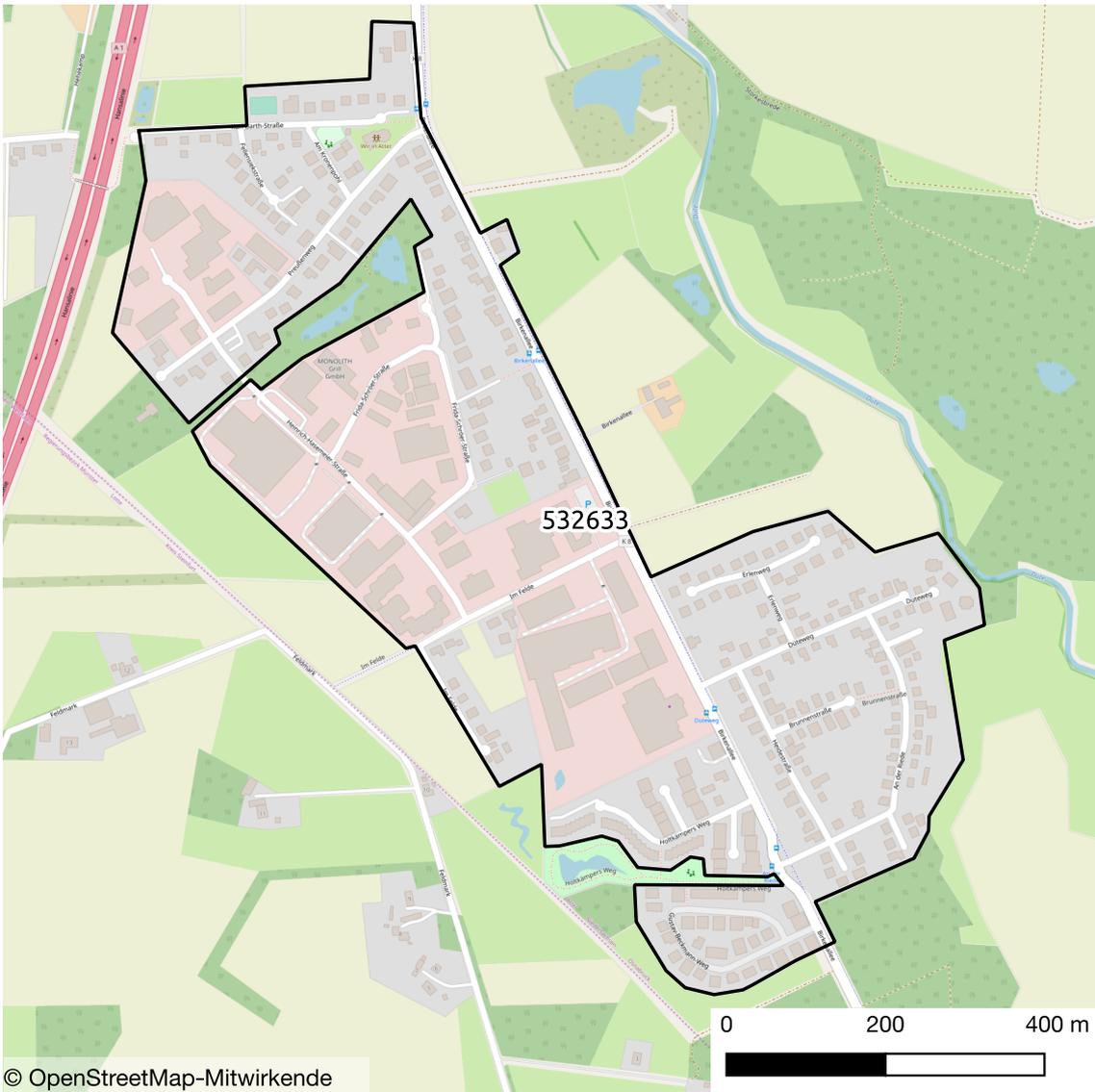


Abbildung 158 Flächenermittlung Osnabrück Preußenweg (Quelle: Karte [150])

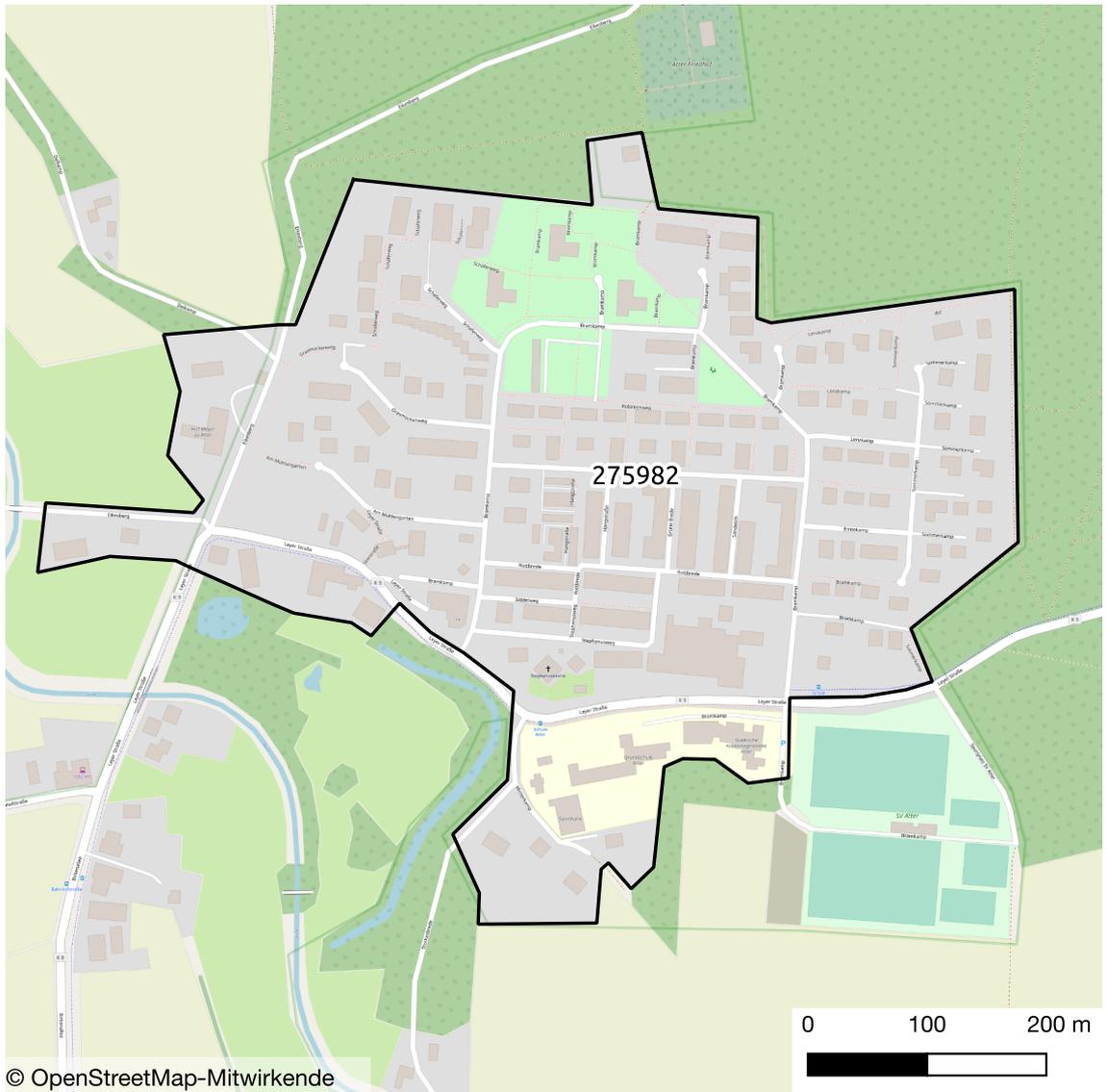


Abbildung 159 Flächenermittlung Osnabrück Bramkamp (Quelle: Karte [151])

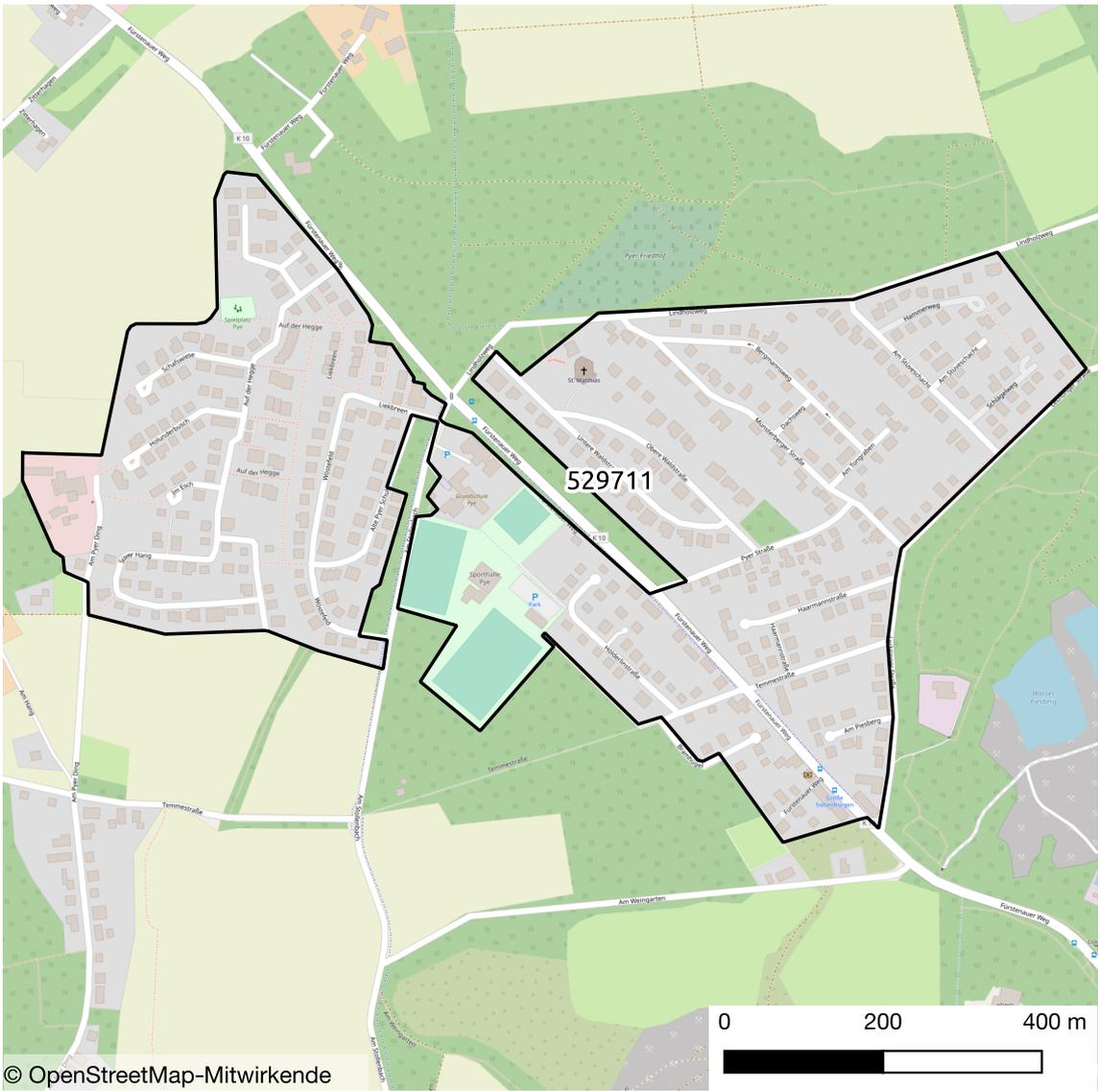


Abbildung 160 Flächenermittlung Osnabrück Fürstenauer Weg (Quelle: Karte [152])

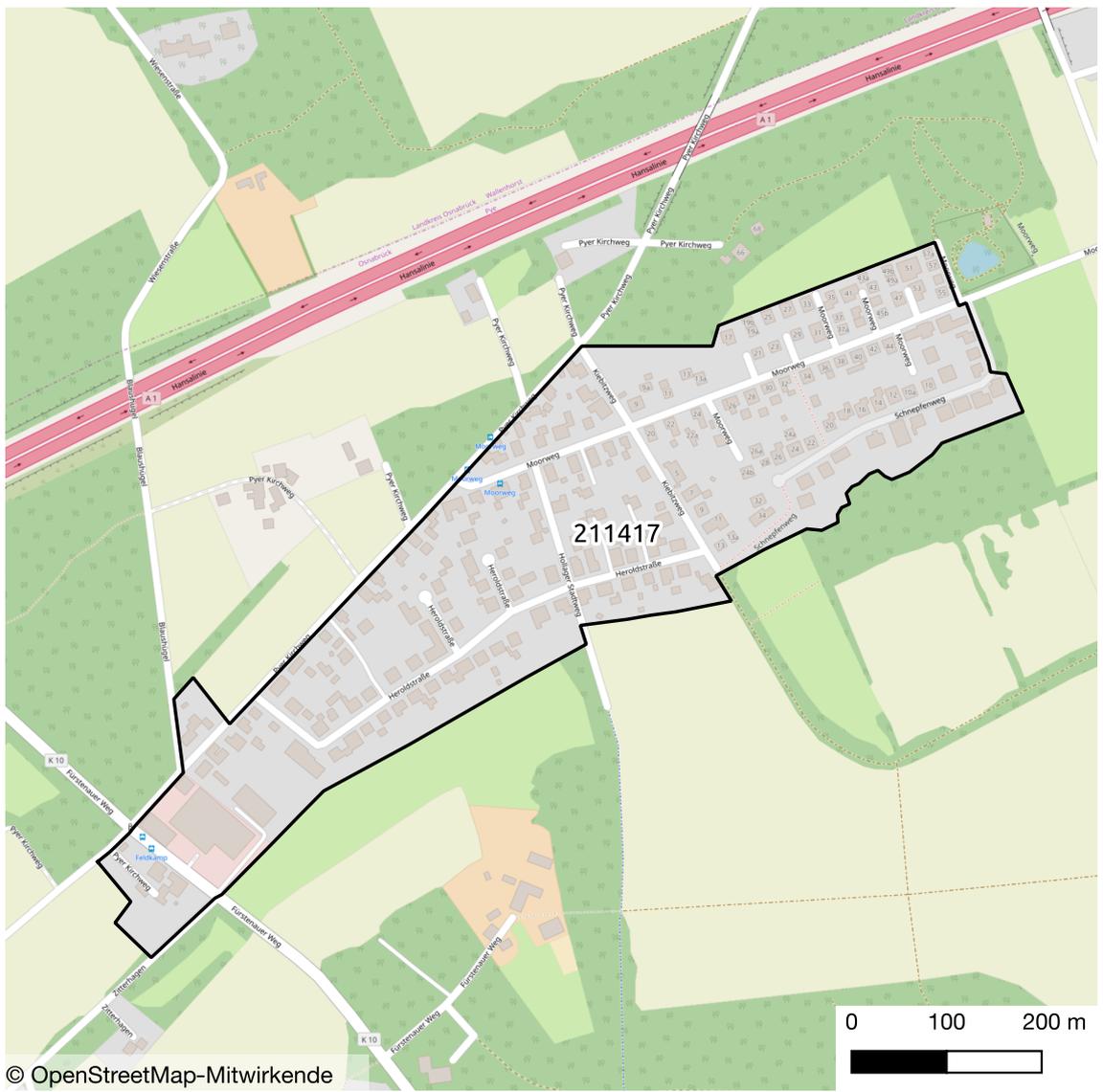


Abbildung 161 Flächenermittlung Osnabrück Pyer Kirchweg (Quelle: Karte [153])

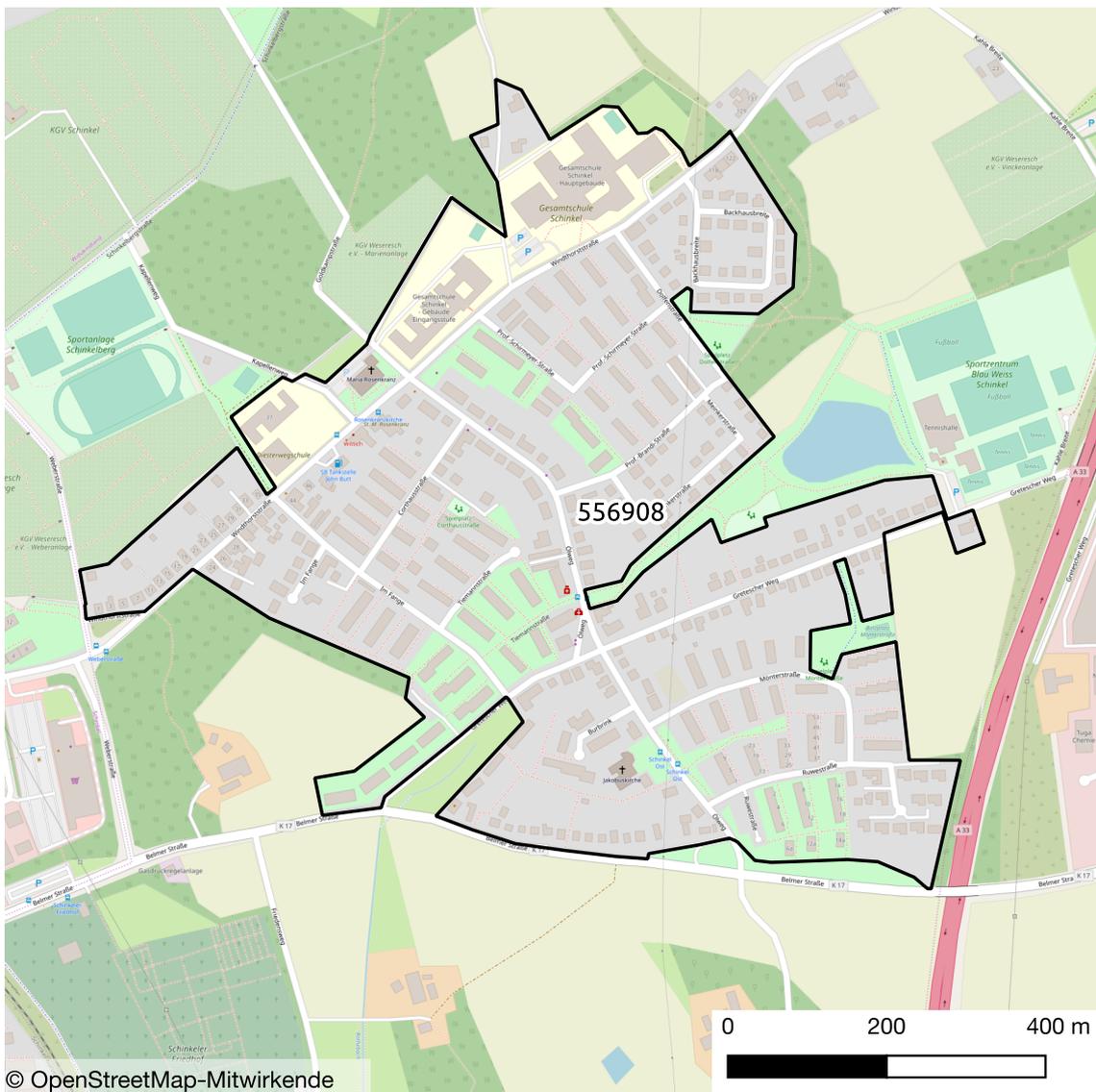


Abbildung 162 Flächenermittlung Osnabrück Gretescher Weg (Quelle: Karte [154])

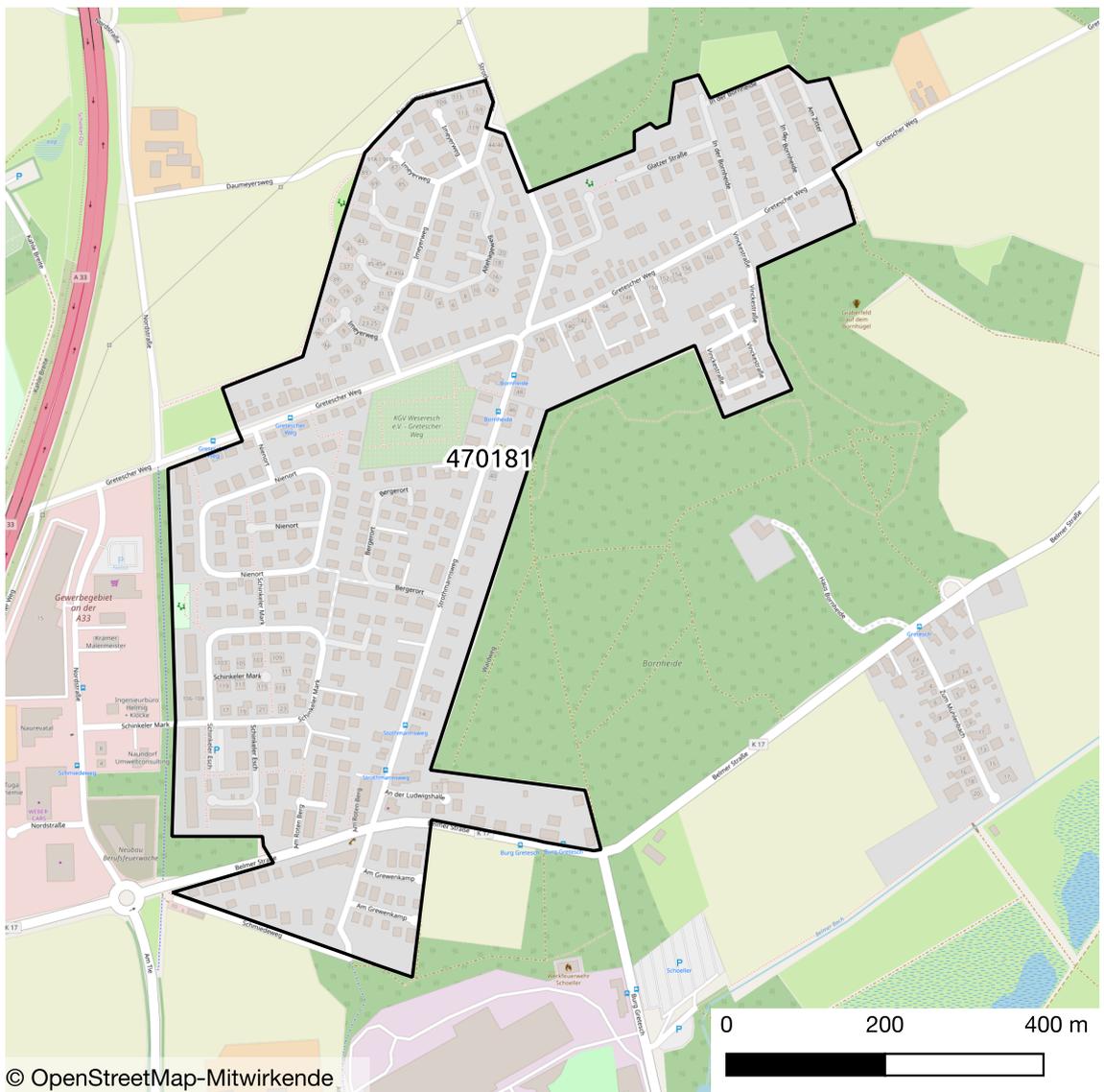


Abbildung 163 Flächenermittlung Osnabrück Strothmannsweg (Quelle: Karte [155])

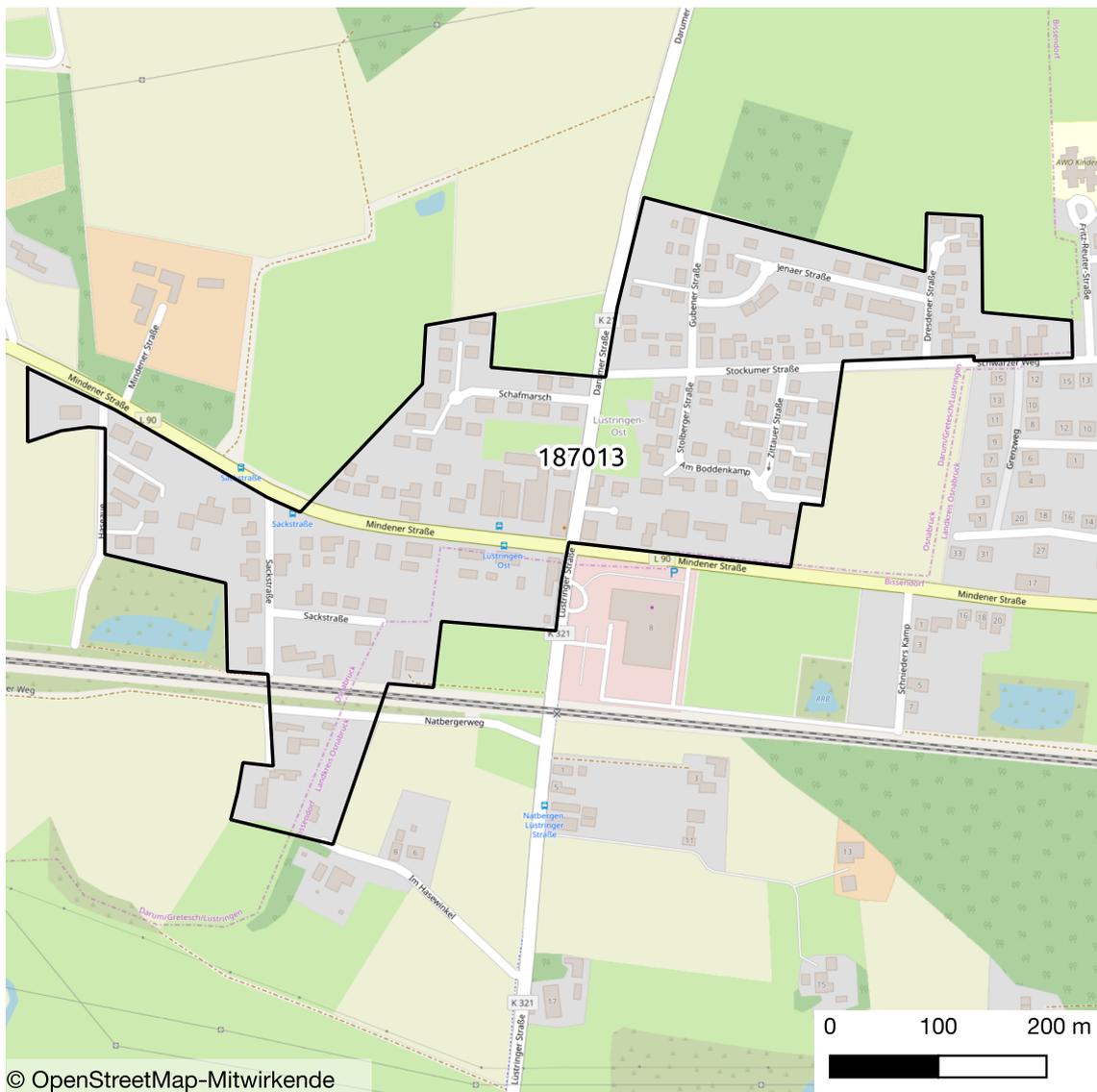


Abbildung 164 Flächenermittlung Osnabrück Hauptmannstraße (Quelle: Karte [156])

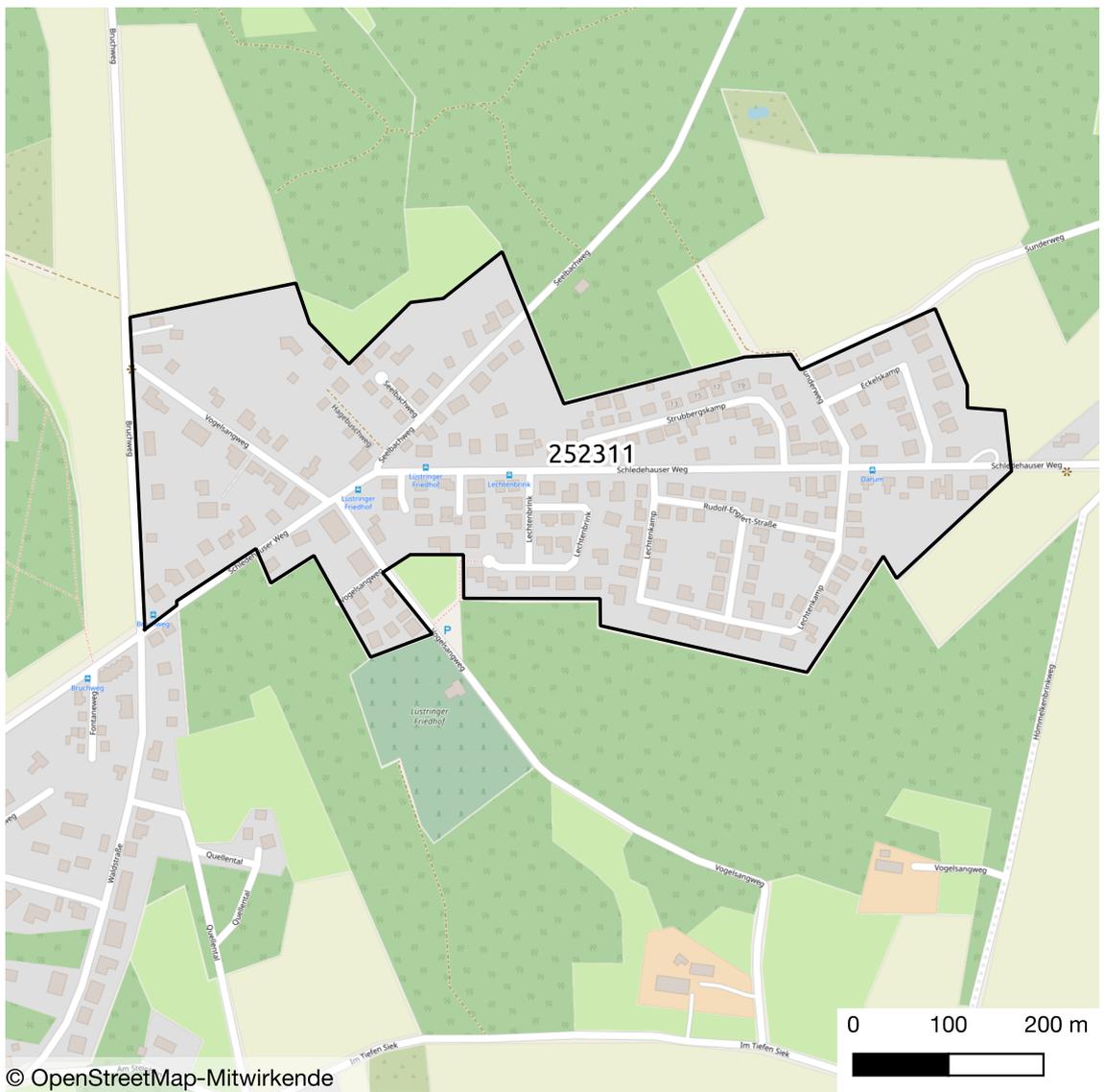


Abbildung 165 Flächenermittlung Osnabrück Schledehauser Weg (Quelle: Karte [157])

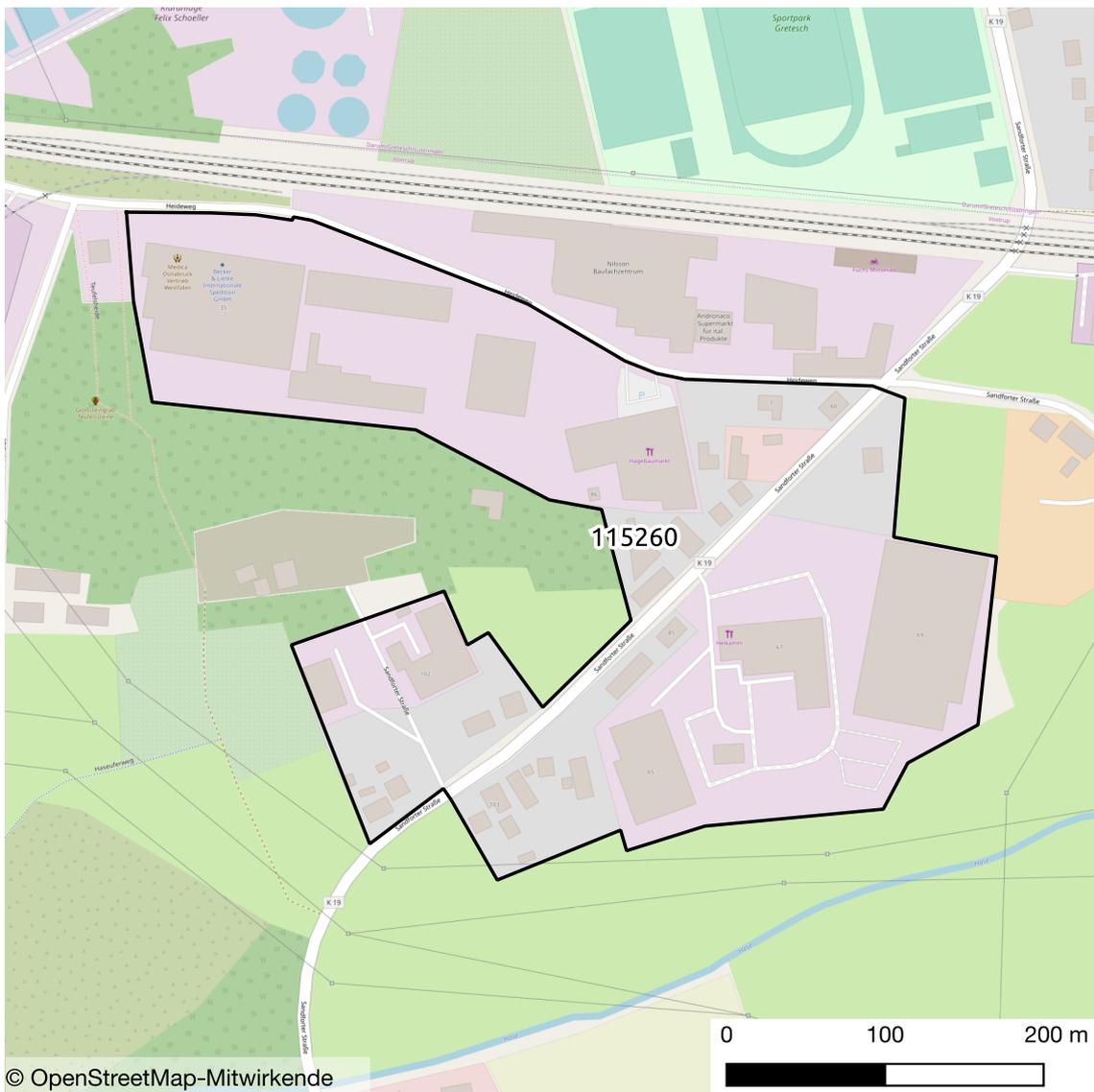


Abbildung 166 Flächenermittlung Osnabrück Sandforter Straße (Quelle: Karte [158])

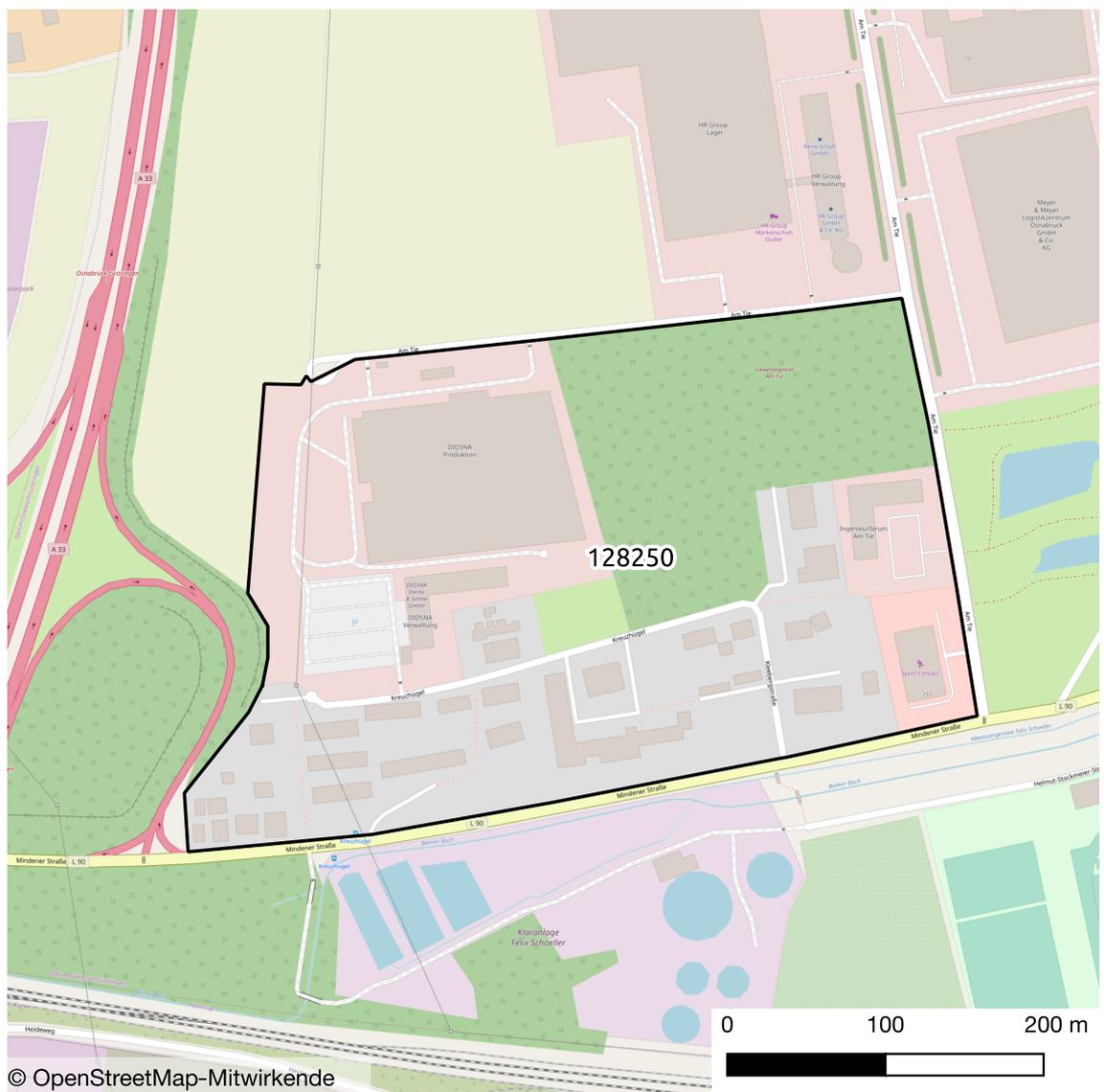


Abbildung 167 Flächenermittlung Osnabrück Kreuzhügel (Quelle: Karte [159])

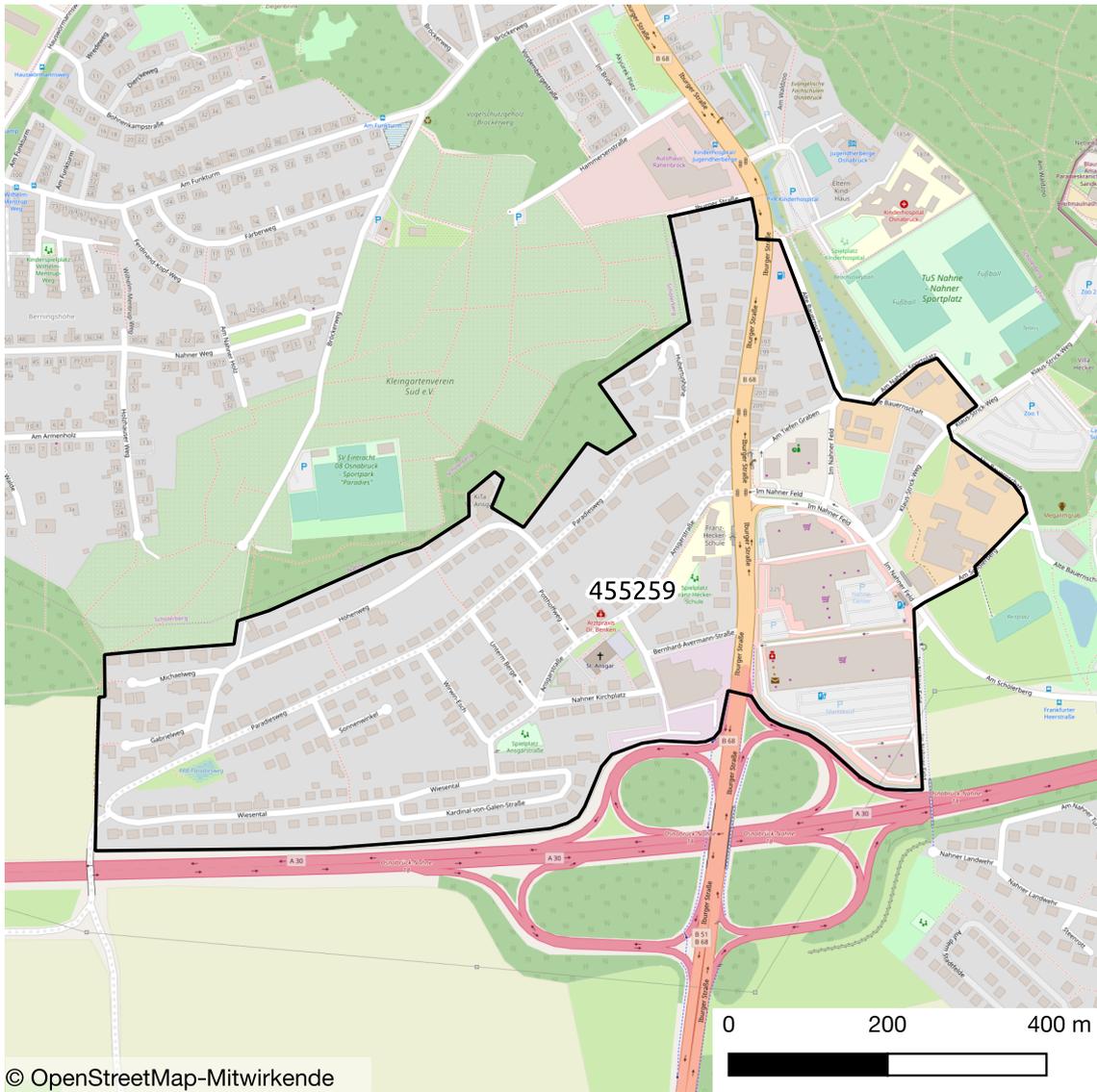


Abbildung 168 Flächenermittlung Osnabrück Ansgarstraße (Quelle: Karte [160])

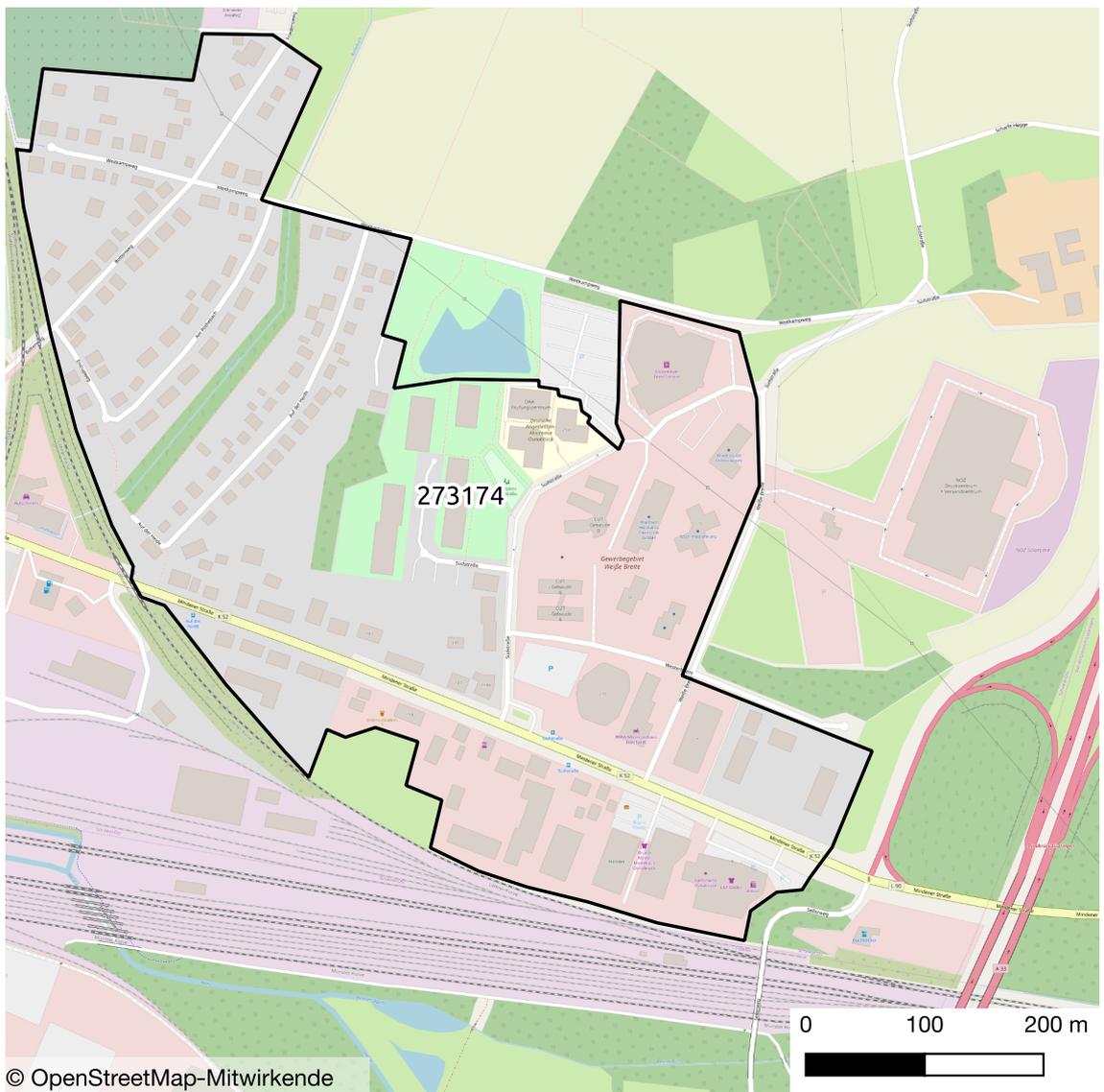


Abbildung 169 Flächenermittlung Osnabrück Auf der Heide (Quelle: Karte [161])

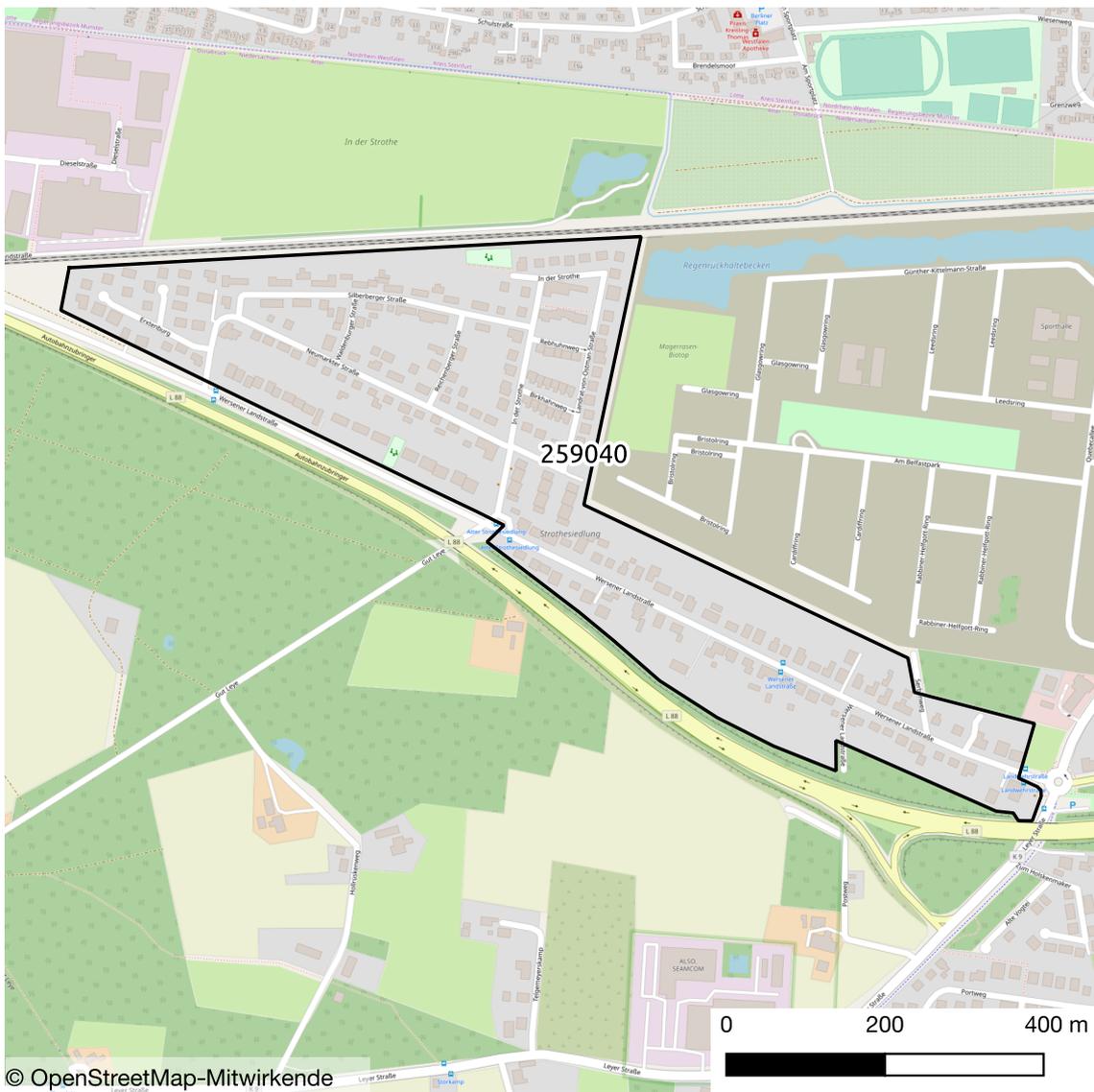


Abbildung 170 Flächenermittlung Osnabrück Wersener Landstraße (Quelle: Karte [162])

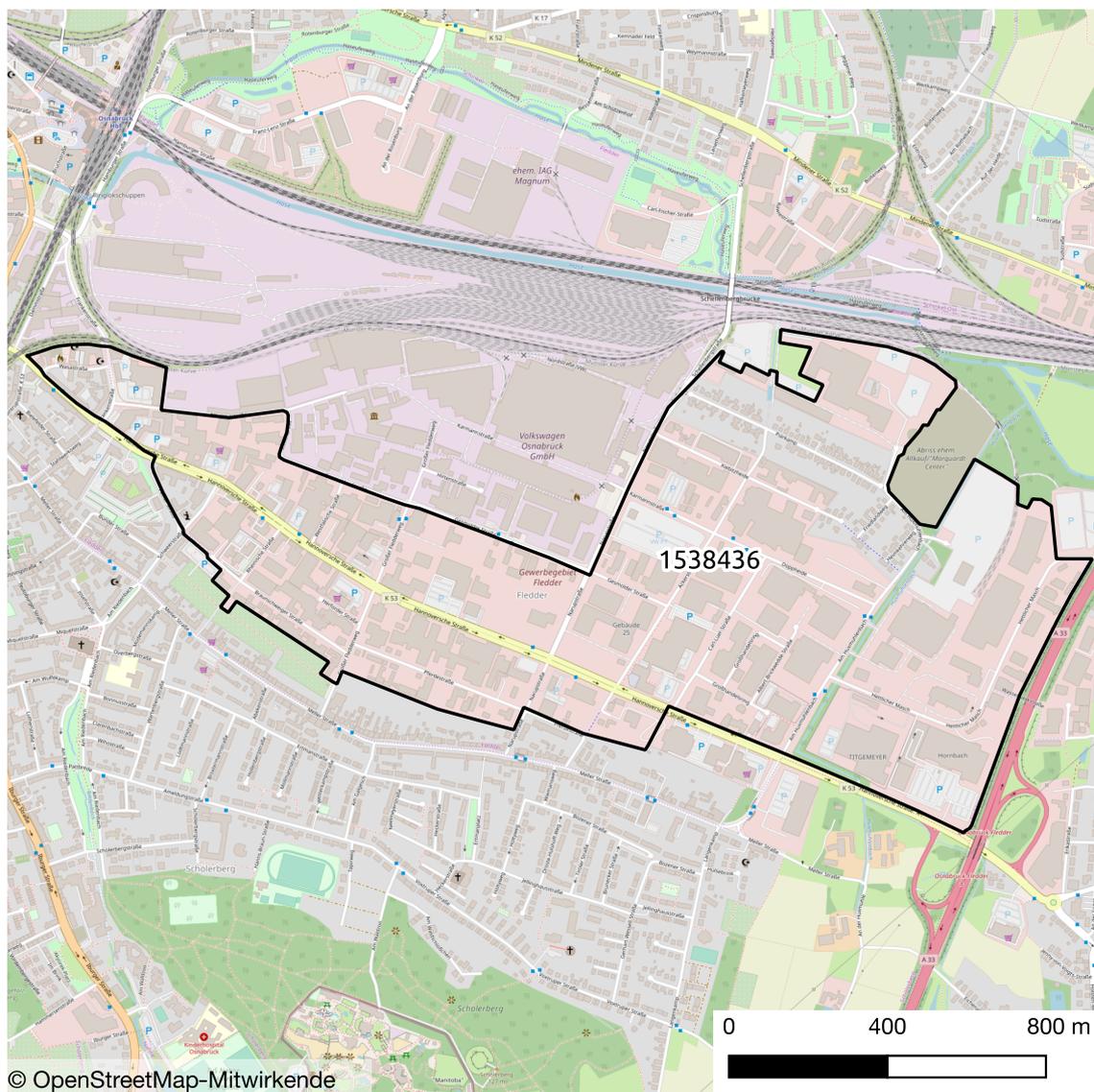


Abbildung 171 Flächenermittlung Osnabrück Hannoversche Straße (Quelle: Karte [163])

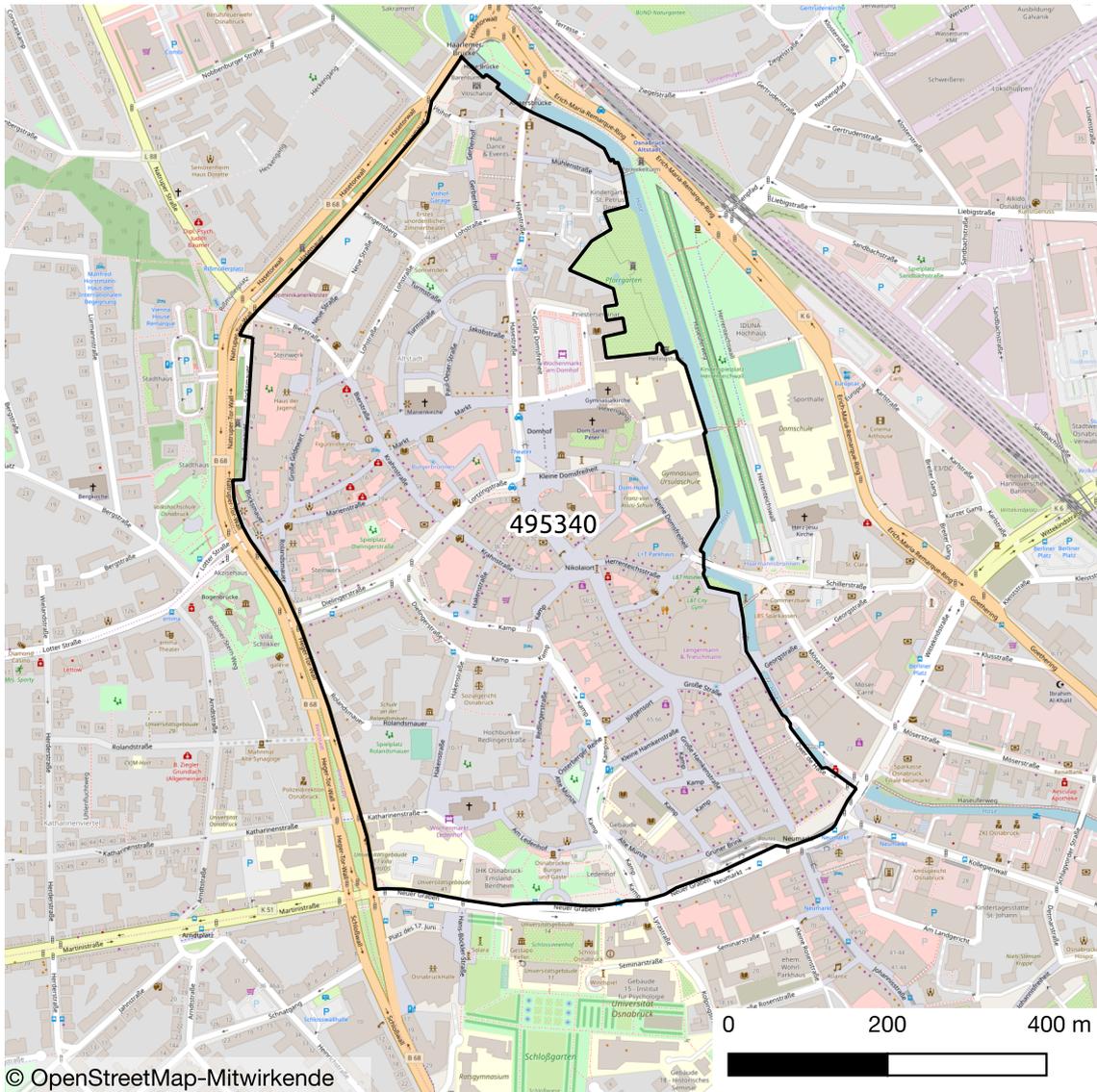


Abbildung 172 Flächenermittlung Osnabrück Hasestraße (Quelle: Karte [164])

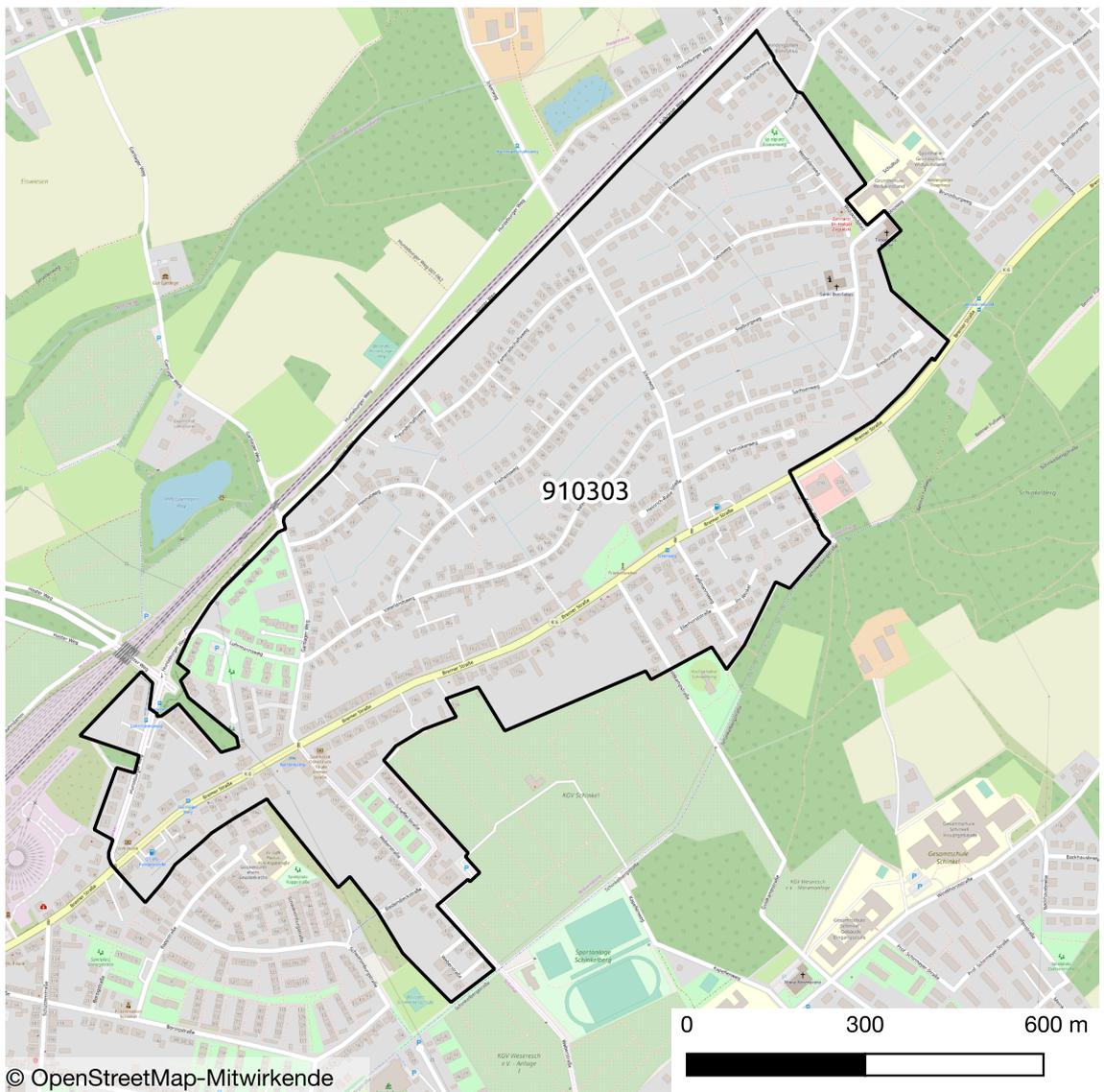


Abbildung 173 Flächenermittlung Osnabrück Freiheitsweg (Quelle: Karte [165])

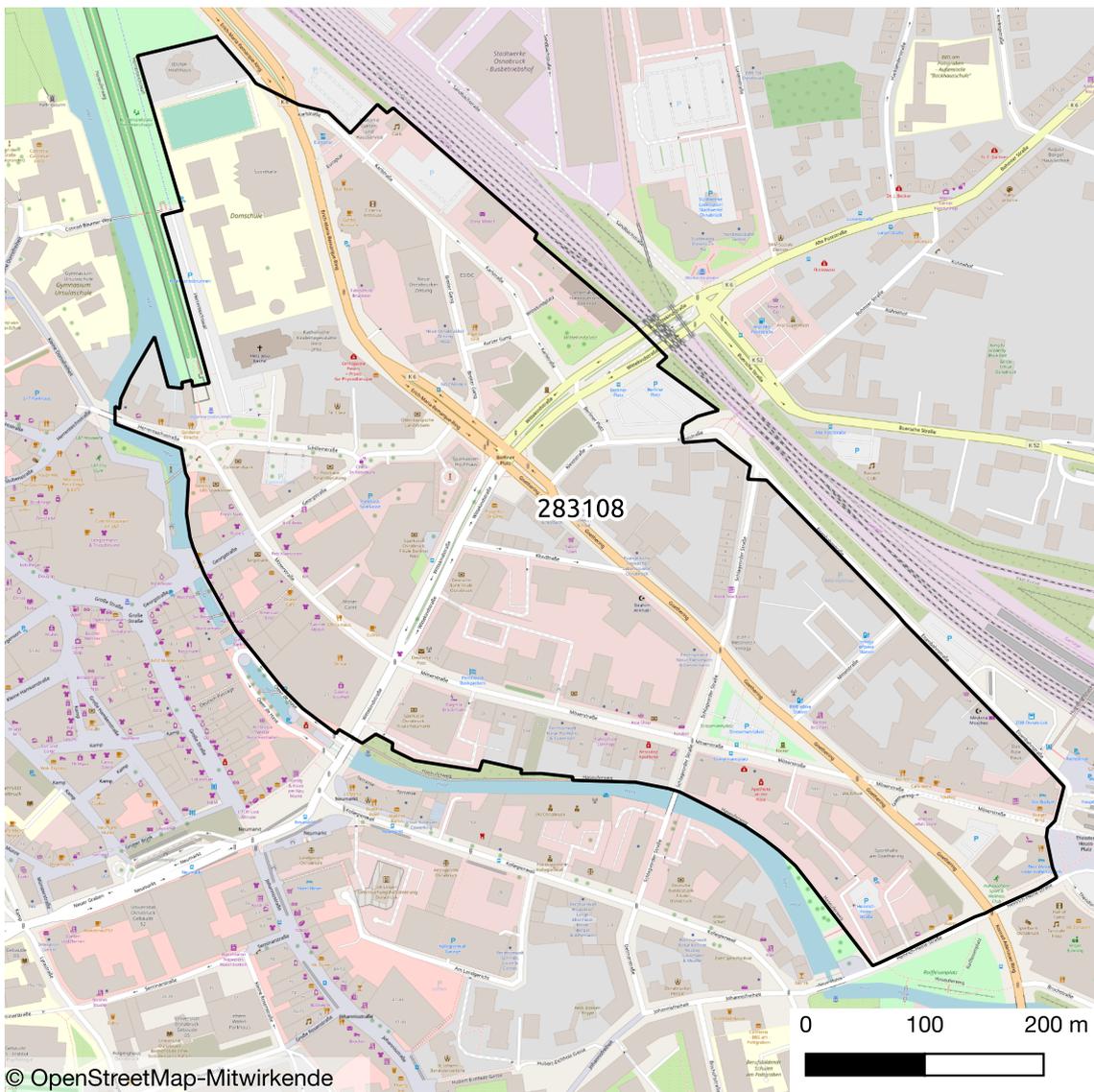


Abbildung 174 Flächenermittlung Osnabrück Goethering (Quelle: Karte [166])

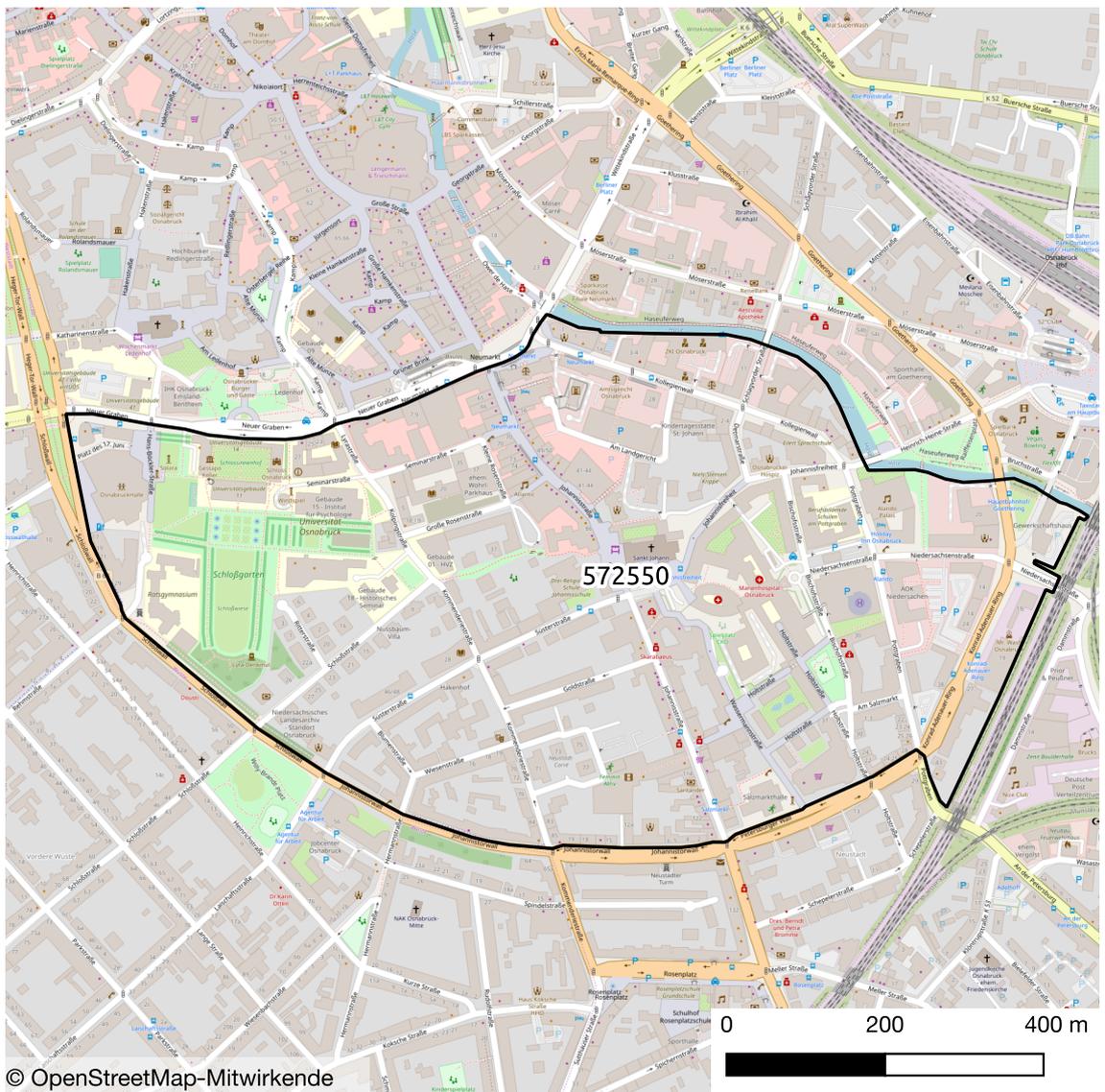


Abbildung 175 Flächenermittlung Osnabrück Susterstraße (Quelle: Karte [167])

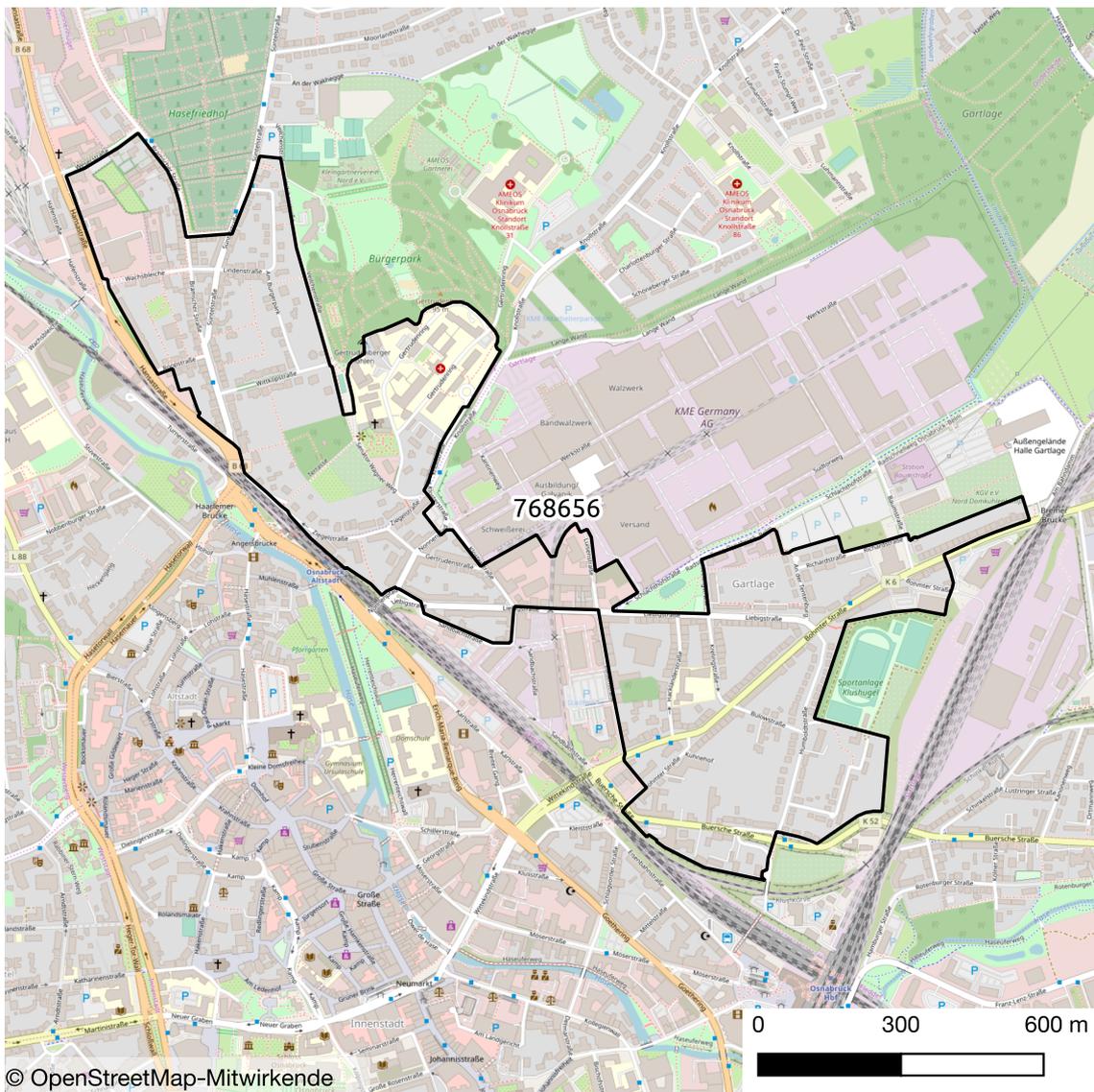


Abbildung 176 Flächenermittlung Osnabrück Bohmter Straße (Quelle: Karte [168])

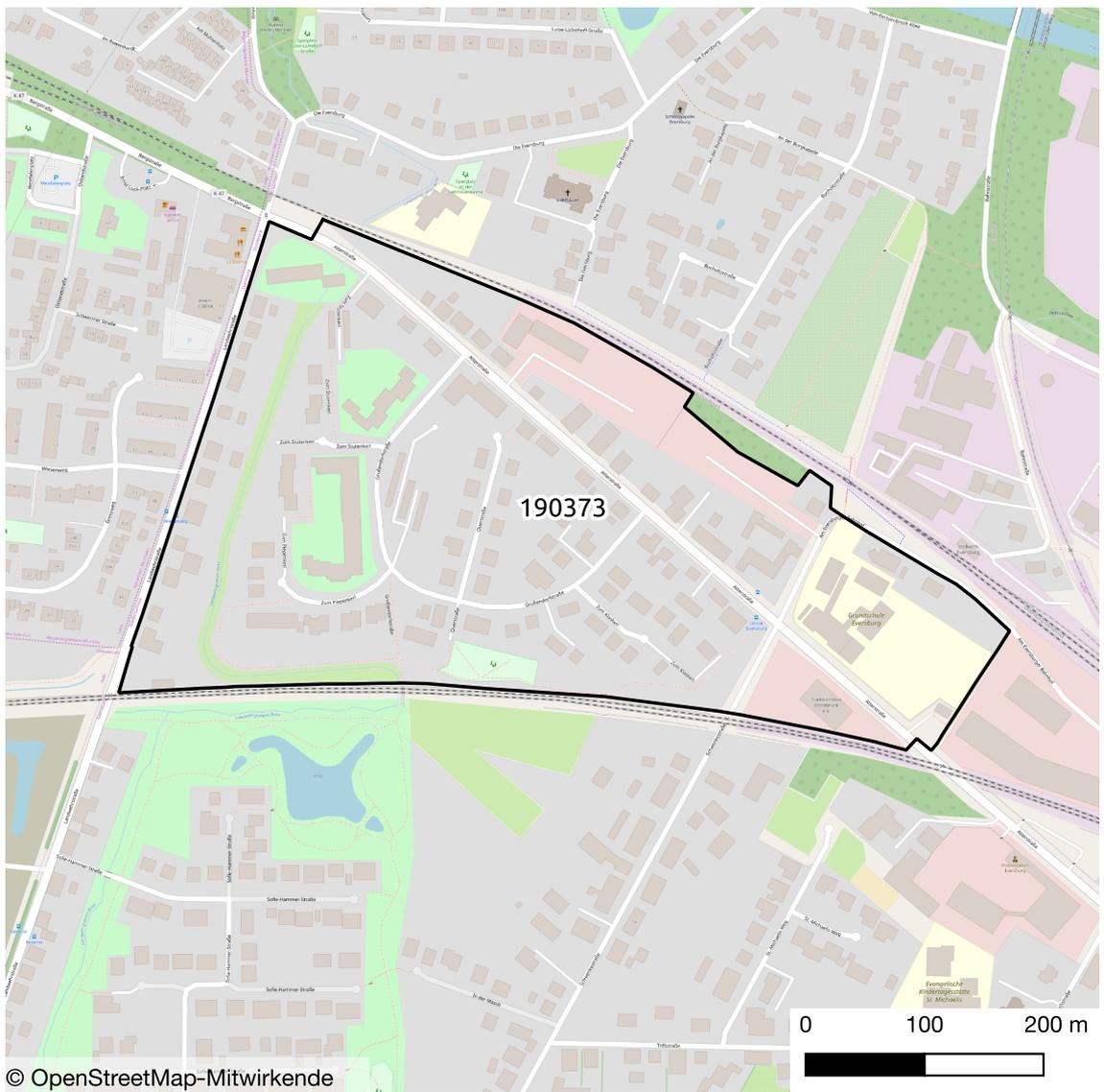


Abbildung 177 Flächenermittlung Osnabrück Atterstraße (Quelle: Karte [169])

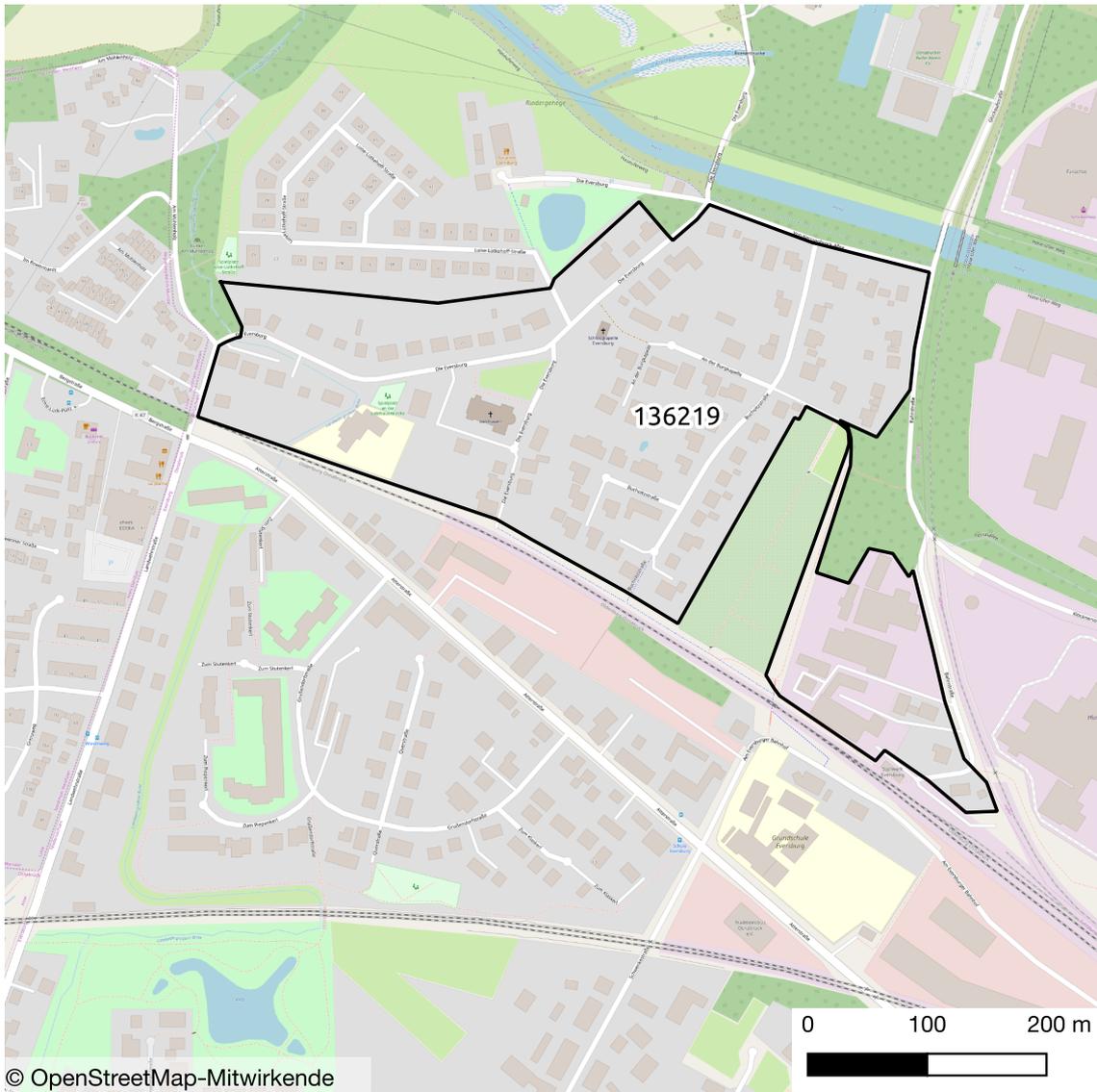


Abbildung 178 Flächenermittlung Osnabrück Buchholtzstraße (Quelle: Karte [170])

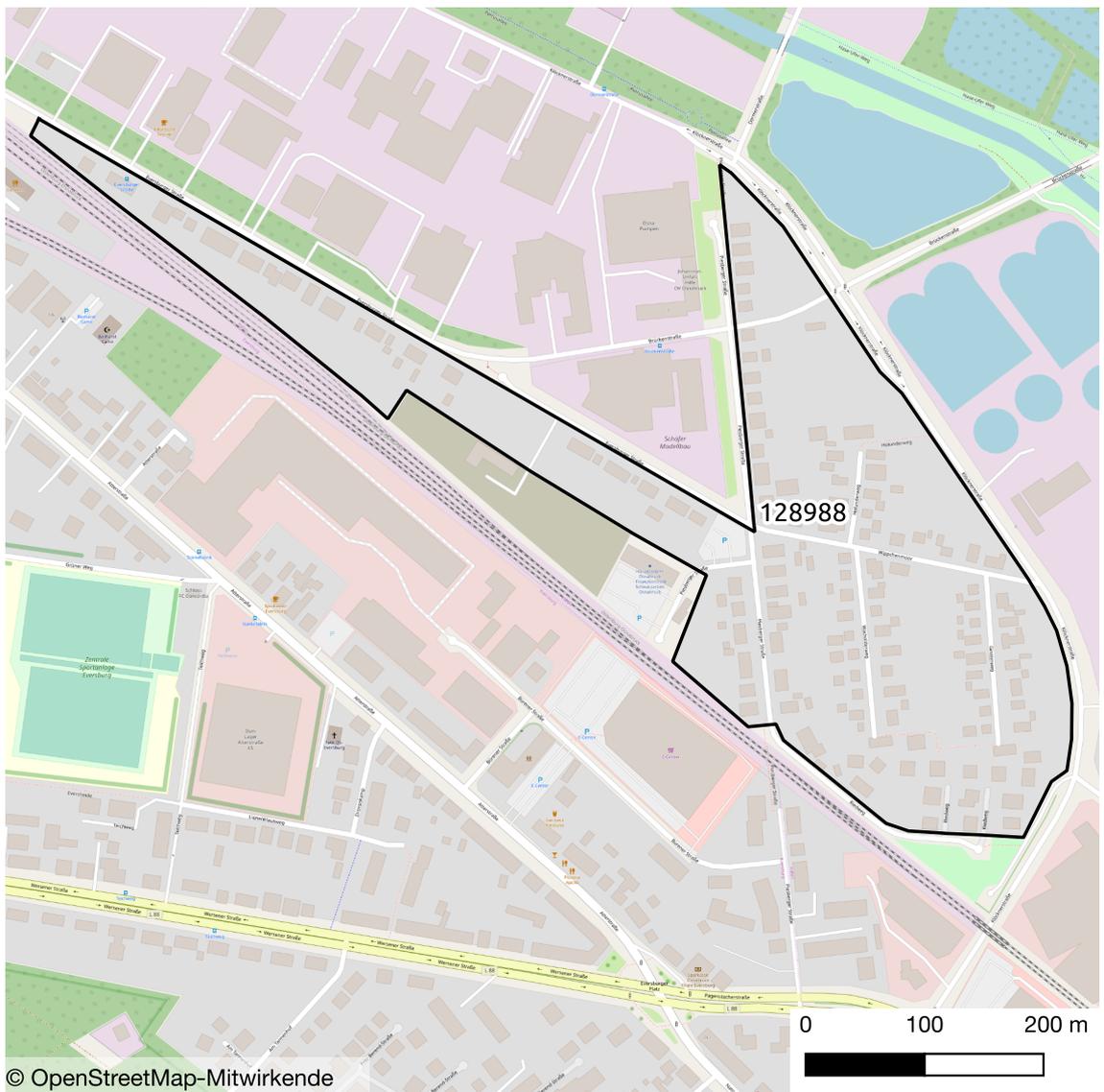


Abbildung 179 Flächenermittlung Osnabrück Piesberger Straße (Quelle: Karte [171])

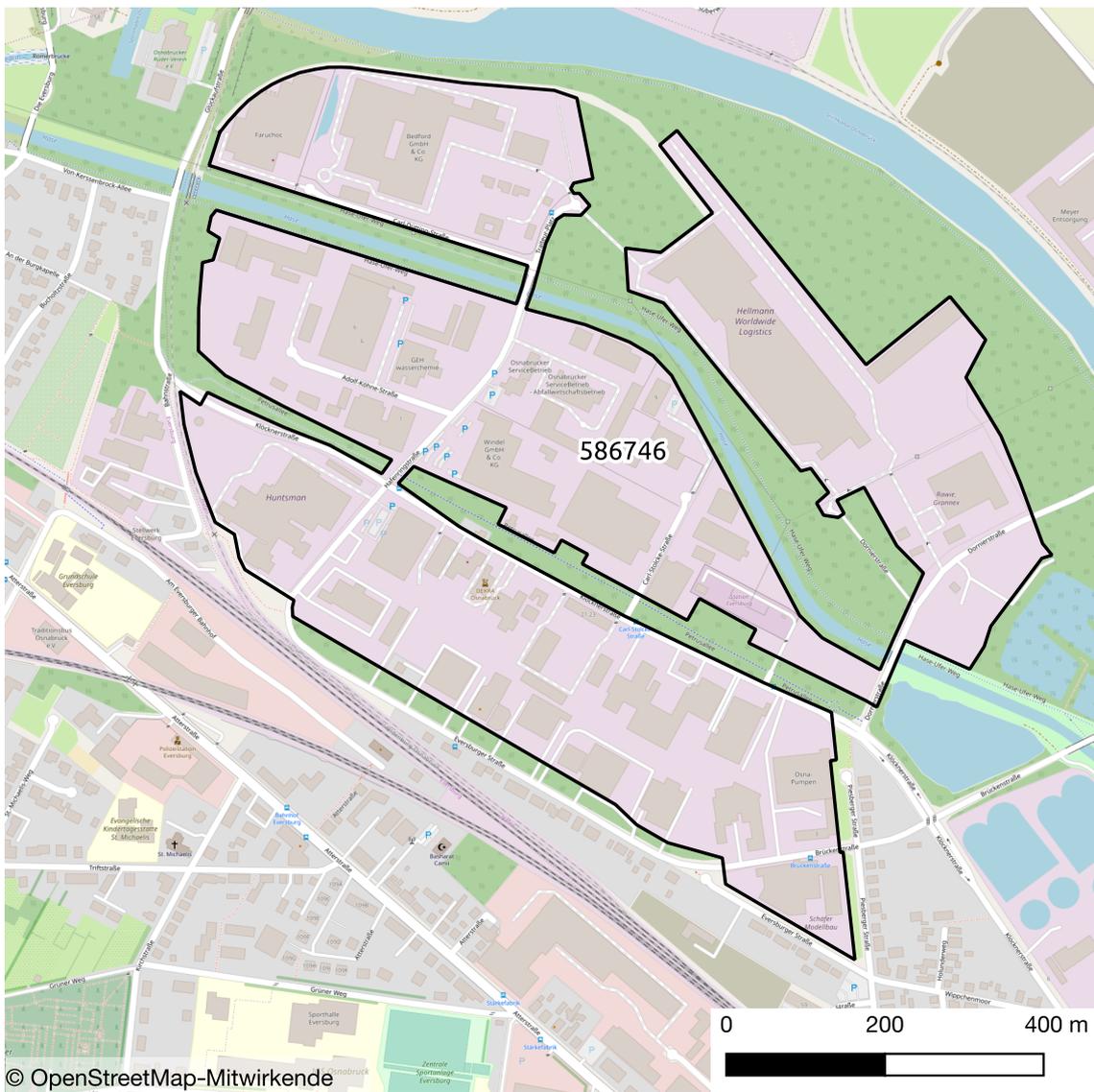


Abbildung 180 Flächenermittlung Osnabrück Klöcknerstraße (Quelle: Karte [172])

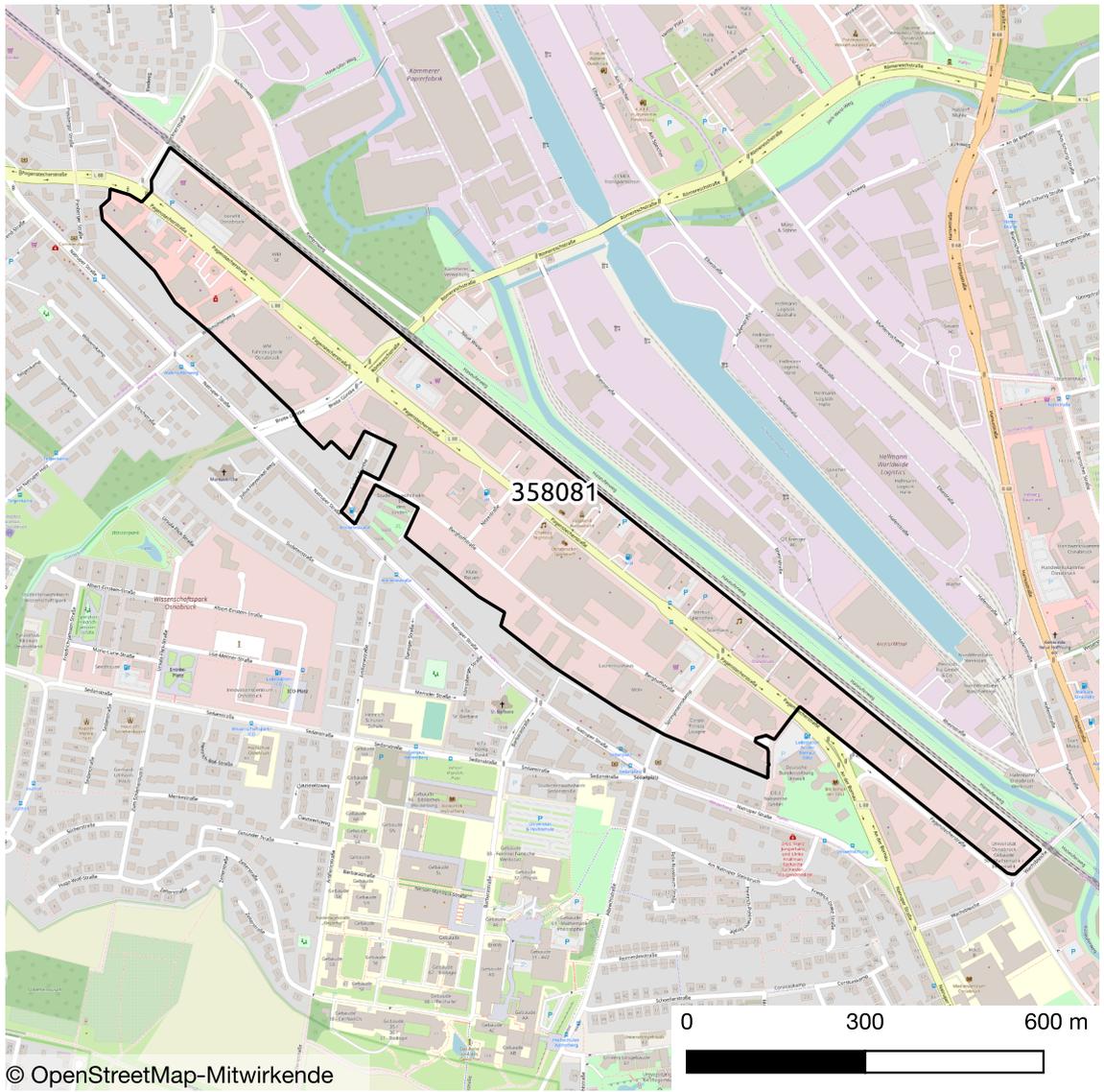


Abbildung 181 Flächenermittlung Osnabrück Pagenstecherstraße (Quelle: Karte [173])

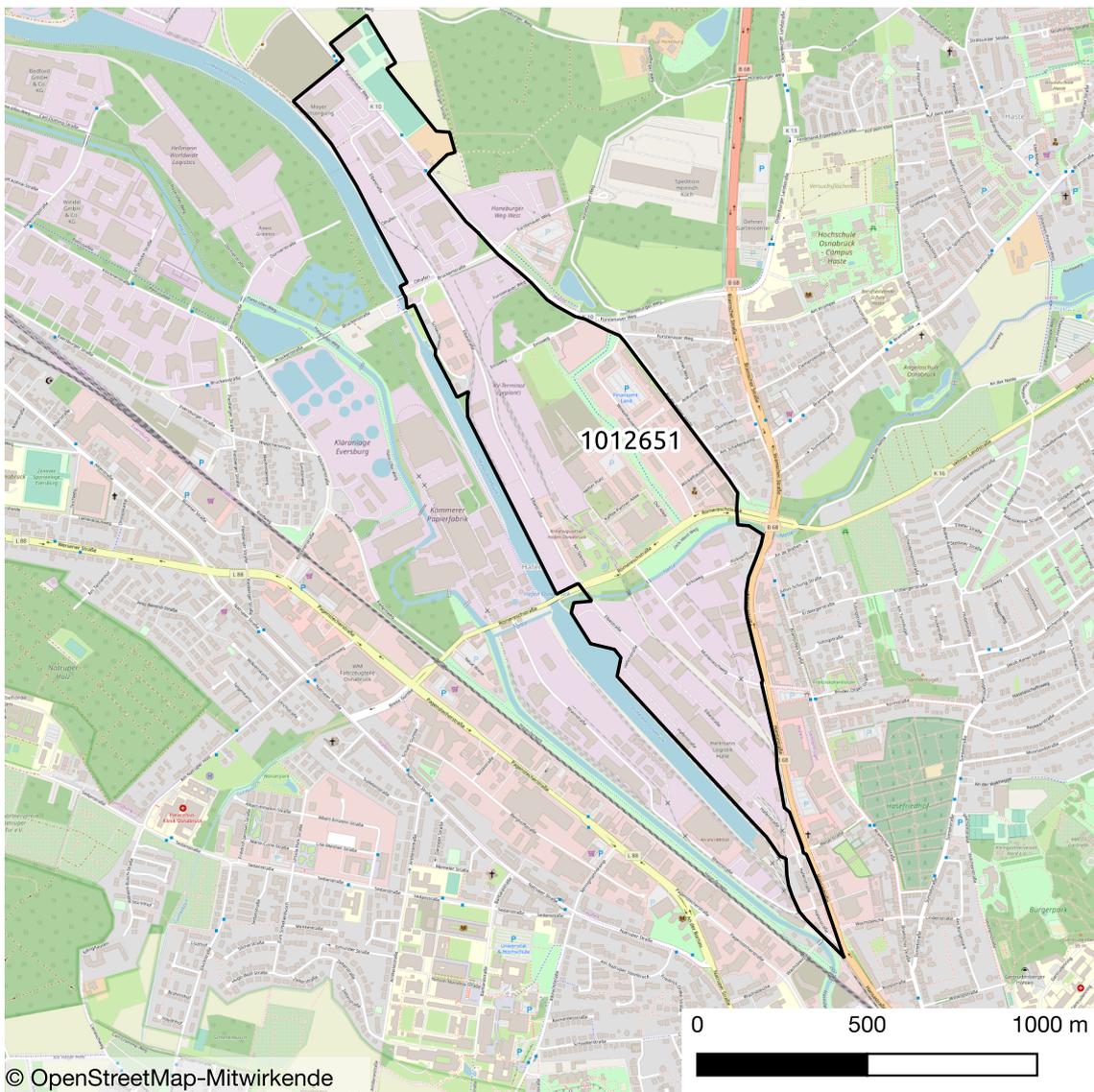


Abbildung 182 Flächenermittlung Osnabrück Elbestraße (Quelle: Karte [174])

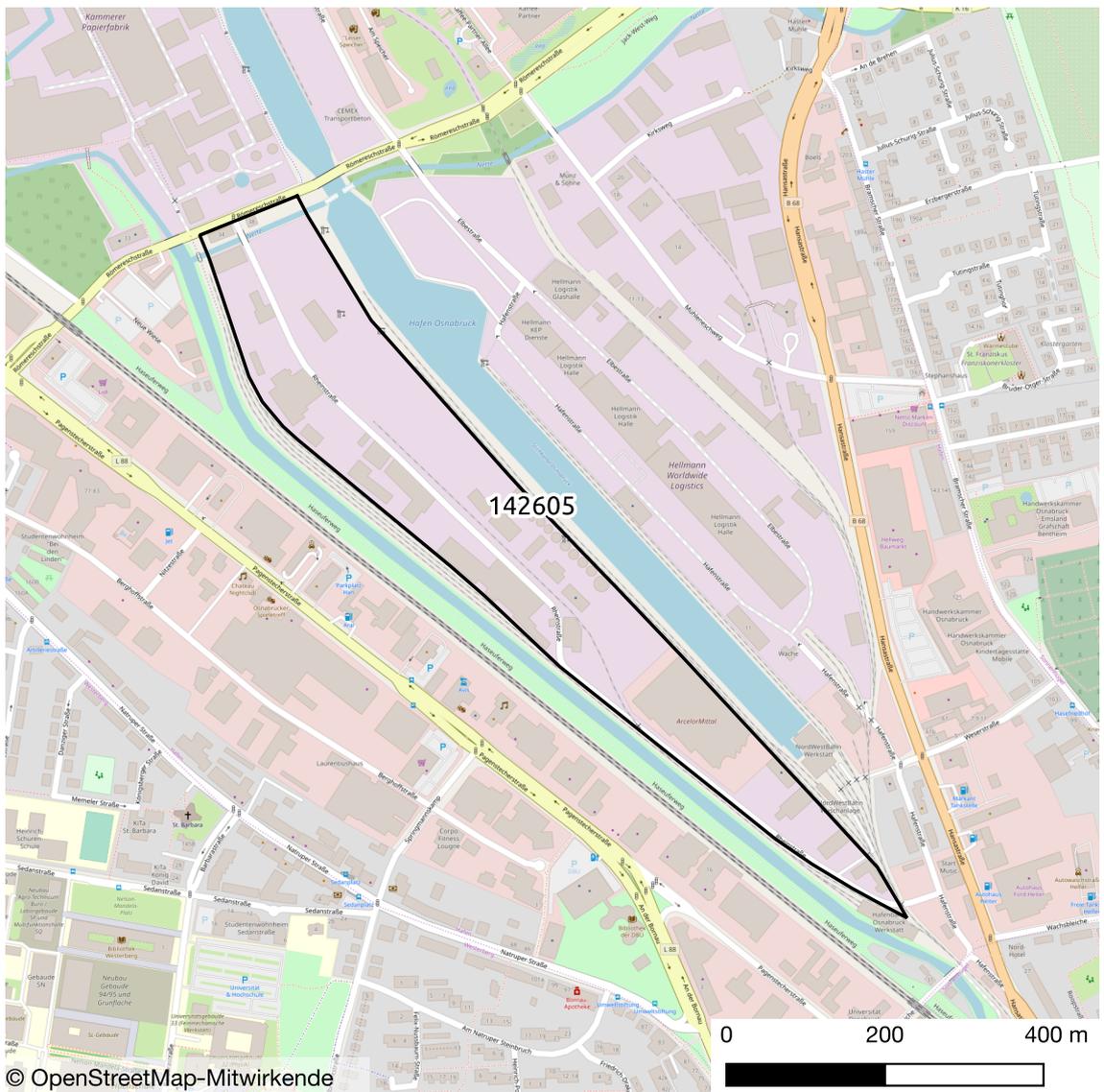


Abbildung 183 Flächenermittlung Osnabrück Rheinstraße (Quelle: Karte [175])

C. Karte des Projektes Ehemalige Prinz-Eugen-Kaserne in München

Die dargestellte Karte basiert auf den Daten von OSM und ist mit der Software QGIS erstellt. In der Karte ist das zu betrachtende Gebiet umrandet und die gemessene Fläche eingetragen.



Abbildung 184 Flächenermittlung München Cosimastraße (Quelle: Karte [176])