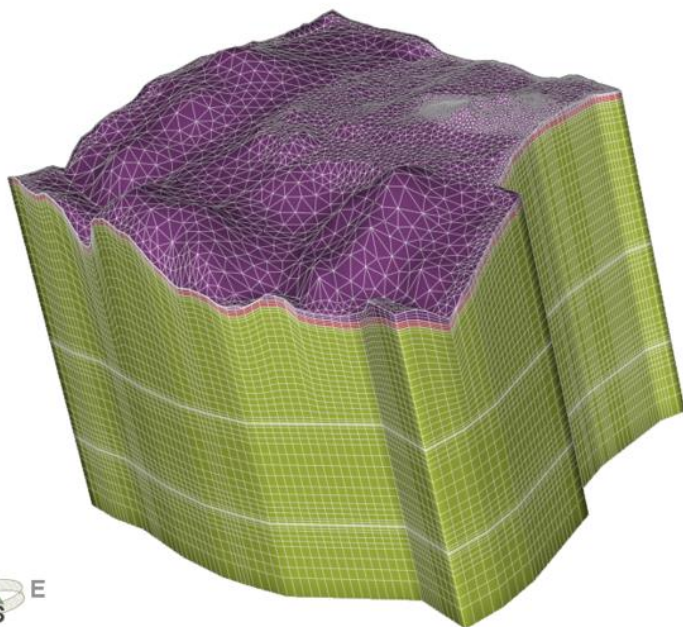
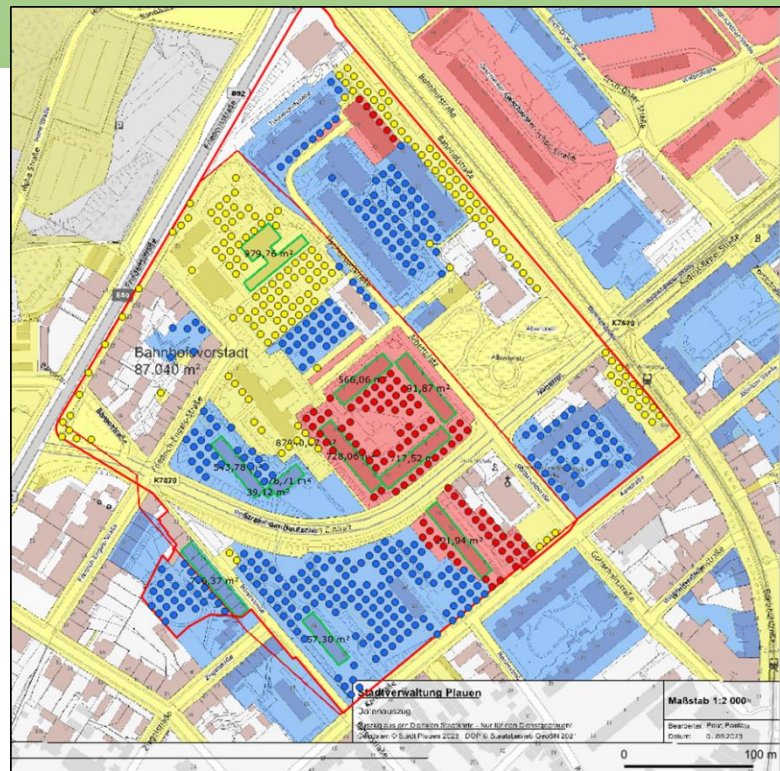


Machbarkeitsstudie Erdwärme in sächsischen Quartieren

Abschlussbericht



FEFLOW (R)



Machbarkeitsstudie zur Erforschung des Einsatzes oberflächennaher Erdwärme für Quartierslösungen in Sachsen

M. Sc. H. Konstanze Zschoke, M. Sc. Petr Novak, M. Sc. Anne Rannefeld, M. Sc. Anna Uhlig,
M. Sc. Tom Reinhardt (geoENERGIE Konzept GmbH),

Dipl.-Wi.-Ing. Sebastian Schwiedersky, M. Sc. Mathias Pannwitz, B. Eng. Gabriel Scherf, Dipl.-Ing. (FH)
Georg Püschel (Integral Projekt GmbH & Co. KG)

unter Mitarbeit von Karina Hofmann, M. Sc. Anna Uhlig (LfULG)

im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Projektpartner:

Stadt Plauen, Fachbereich Bau und Umwelt, Fachbereich Gebäude- und Anlagenverwaltung,
enviaTHERM GmbH, Energie- und Klimaschutzbeauftragter des Vogtlandkreises

Inhaltsverzeichnis

Glossar	17
1 Motivation und Zielstellung	21
2 Oberflächennahe geothermische Wärmequellsysteme	23
2.1 Erdwärmesonden	23
2.2 Grundwasserwärmepumpen	25
2.3 Erdwärmekollektoren und Erdwärmekörbe	25
2.4 Thermisch aktivierte Bauteile und Energiepfähle	27
2.5 Grubenwassernutzung	27
2.6 Tiefe Erdwärmesonden	28
3 Charakteristik der Beispielquartiere	29
3.1 Rückert Campus	29
3.2 Quartier Bahnhofsvorstadt	30
3.3 Gewerbegebiet Oberlosa	31
4 Geologische-geothermische Verhältnisse	33
4.1 Geowissenschaftliche Einordnung des Raums Plauen	33
4.1.1 Vorgehen zur Bestimmung geologischer Verhältnisse	33
4.1.2 Bestimmung hydrogeologischer Verhältnisse	38
4.1.3 Thermische Verhältnisse - Zusammenfassung und Analyse des vorhandenen Wissens	39
4.2 Geologisches und geothermisches Modell	46
4.2.1 Geologisches Modell-GeoPLASMA-CE	46
4.2.2 Erstellen eines geothermischen Modells	46
4.2.2.1 Gesteinswärmeleitfähigkeit	46
4.2.2.2 Campus Rückertschule	48
4.2.2.3 Bahnhofsvorstadt	50
4.2.2.4 Oberlosa	51
4.2.3 Untergrundtemperaturmodell	54
5 Technische Grundlagen	56
5.1 Wärmepumpe	56
5.1.1 Effizienz einer Wärmepumpe	57
5.1.1.1 Regeneration des Untergrundes	58
5.1.2 Weitere Umweltwärmequellen	59
5.1.2.1 Solarthermie / Photovoltaik-Thermie (PVT)	60
5.1.2.2 Photovoltaik mit Power-to-Heat (PtH)	61

5.1.2.3	Abwärme / Abwasser	61
5.1.2.4	Gebäudekühlung	61
5.1.2.5	Thermische Bauteilaktivierung.....	62
5.1.2.6	Solare Luftkollektoren.....	62
5.1.2.7	Rückkühler / Luftkühler.....	63
5.1.2.8	Vergleich der Umweltwärmequellen zur Regeneration	69
5.1.3	Kältemittel	71
5.1.3.1	Klassifizierung.....	72
5.1.3.2	Global Warming Potential	73
5.1.4	Betriebsweise.....	73
5.2	Wärmeverteilersysteme / Wärmenetze	77
5.3	Anlagentechnik	81
5.3.1	Arten der Wärmeübergabe	81
5.3.2	Heizkörperdimensionierung	83
5.3.3	Niedertemperaturtauglichkeit.....	85
5.3.4	Arten der Warmwasserbereitung	88
6	Berechnungsgrundlagen.....	91
6.1	Gebäudemodell	91
6.1.1	Lastkurven Gebäude.....	91
6.1.2	Technische Annahmen	92
6.1.3	Wetterdaten	93
6.1.4	Wirtschaftliche Annahmen	94
7	Fördermöglichkeiten.....	95
8	Geothermische Machbarkeitsstudie Beispielquartier Rückert Campus	97
8.1	Gebäudeanalyse	97
8.1.1	Datengrundlage	97
8.1.2	Spezifische Annahmen	98
8.1.3	Lastgangerstellung / Bedarfsermittlung.....	98
8.1.3.1	Oberschule Friedrich Rückert.....	99
8.1.3.2	Grundschule Friedrich Rückert	101
8.1.3.3	Hortgebäude Friedrich Rückert	104
8.1.4	Zusammenfassung Rückert Campus	107
8.2	Potenzialanalyse Photovoltaik	108
8.3	Potenzialanalyse Wärmequellen	111
8.3.1	Potenzialanalyse Luftwärmenutzung.....	111

8.3.2	Potenzialanalyse Geothermie	111
8.3.2.1	Positionierung der Sonden am Standort.....	112
8.4	Quartiersanalyse.....	114
8.4.1	Wärmetrasse zur zentralen Versorgung.....	114
8.5	Variantenerstellung	115
8.6	Geothermische Dimensionierung	117
8.6.1	Geothermische Randbedingungen	117
8.6.1.1	Wärmeleitfähigkeit	118
8.6.1.2	Untergrundtemperatur	119
8.6.2	Simulationsrandbedingungen	119
8.6.3	Dimensionierungsergebnisse.....	119
8.6.4	3D-Thermohydrodynamische Modellierung	120
8.7	Technische Dimensionierung.....	125
8.7.1	Rückkühler	127
8.7.2	PV-Anlage	128
8.8	Energiebilanz	129
8.9	Investitionskosten	130
8.10	Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	131
8.11	Fazit Beispielquartier Rückert Campus	132
9	Geothermische Machbarkeitsstudie am Beispielquartier Bahnhofsvorstadt.....	133
9.1	Gebäudeanalyse	133
9.1.1	Datengrundlage	133
9.1.2	Gebäude-Clusterung.....	134
9.1.3	Definition von Sanierungsmaßnahmen.....	135
9.2	Potenzialanalyse Wärmequellen	136
9.2.1	Potenzialanalyse Geothermie	136
9.2.2	Positionierung der Sonden am Standort.....	137
9.2.3	Potenzialanalyse Luftwärmenutzung.....	140
9.2.4	Potenzialanalyse PV-Stromerzeugung	141
9.3	Erstellung einer HeatMap	142
9.3.1	Bedarfs- und Potenzialstruktur	142
9.3.2	Gebiets-Clusterung.....	143
9.4	Quartiersanalyse.....	144
9.4.1	Datenermittlung	144
9.4.2	Ermittlung des perspektivischen Bedarfes.....	149

9.4.3	Vorauswahl der Versorgungsstruktur	149
9.4.4	Quartierssteckbrief	151
9.5	Variantenerstellung	152
9.5.1	Variantenüberblick	152
9.5.2	Variante 1	152
9.5.3	Variante 2	157
9.5.4	Variante 3	158
9.5.5	Festlegung einer Vorzugsvariante.....	160
9.5.6	Bedarflastgang-Erstellung der Vorzugsvariante.....	163
9.6	Geothermische Dimensionierung	164
9.6.1	Geothermische Randbedingungen	164
9.6.1.1	Untergrundtemperatur	164
9.6.1.2	Wärmeleitfähigkeit	165
9.6.2	Simulationsrandbedingungen	166
9.6.3	Dimensionierungsergebnisse.....	167
9.6.4	3D-Thermohydrodynamische Modellierung	168
9.7	Technische Dimensionierung.....	174
9.8	Energiebilanz	176
9.9	Investitionskosten	177
9.10	Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	179
9.11	Fazit Beispielquartier Bahnhofsvorstadt.....	180
10	Geothermische Machbarkeitsstudie am Beispielquartier Oberlosa	182
10.1	Datengrundlage und Annahmen.....	182
10.2	Potenzialanalyse Wärmequellen	184
10.2.1	Potenzialanalyse Geothermie	184
10.2.2	Positionierung der Sonden am Standort.....	185
10.2.3	Potenzialermittlung Luftwärmenutzung.....	186
10.2.4	Potenzialermittlung PV-Stromerzeugung	187
10.3	Erstellung einer HeatMap	188
10.4	Quartiersanalyse.....	189
10.5	Variantenerstellung	189
10.5.1	Variante 1	190
10.5.2	Variante 2	191
10.5.3	Variante 3	191
10.5.4	Festlegung einer Vorzugsvariante.....	192

10.6	Geothermische Dimensionierung	193
10.6.1	Geothermische Randbedingungen	193
10.6.1.1	Wärmeleitfähigkeit	193
10.6.1.2	Untergrundtemperatur	196
10.6.2	Simulationsrandbedingungen	196
10.6.3	Dimensionierungsergebnisse.....	197
10.6.4	3D-thermohydrodynamische Modellierung	200
10.7	Technische Dimensionierung.....	203
10.8	Energiebilanz	206
10.9	Investitionskosten	210
10.10	Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	212
10.11	Fazit Beispielquartier Oberlosa.....	214
11	Einfluss von Grundwasserströmung in einem fiktiven Quartier	216
12	Gesamtbewertung und Zusammenfassung.....	224
	Literaturverzeichnis.....	228
A 1	Anhang.....	231
A 2	Beispielquartier Rückert Campus	232
A 2.1	Anlagenschema Rückert Campus	232
A 2.2	Wirtschaftlichkeitsberechnung Rückert Campus.....	233
A 3	Beispielquartier Bahnhofsvorstadt	235
A 3.1	Quartierssteckbrief Bahnhofsvorstadt	235
A 3.2	Wirtschaftlichkeitsberechnung Bahnhofsvorstadt	237
A 4	Beispielquartier Oberlosa	240
A 4.1	Annahmen.....	240
A 4.2	Berechnungs-Ergebnisse.....	240
A 4.3	Oberlosa: HeatMap	241
A 4.4	Oberlosa: Ergebniskarte geothermische und technische Dimensionierung	242
A 4.5	Oberlosa Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	243

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht Einteilung der Erdwärmennutzungen offener und geschlossener Systeme	23
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Erdwärmesonden (links) und einer Grundwasserwärmepumpenanlage (rechts)	24
Abbildung 3: Schematische Darstellung Erdwärmekollektoren (links) und Erdwärmekörbe (rechts) .	26
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Grubenwassernutzung	28
Abbildung 5: Definition des Beispielgebiets Rückert Campus mit Flurstückkarte (links) und Oberflächenbeschaffenheit auf der Orthofotokarte (rechts)	30
Abbildung 6: Vor-Ort Aufnahme des Beispielgebiets Rückert Campus	30
Abbildung 7: Definition des Beispielgebiets Bahnhofsvorstadt mit Flurstückkarte (links) und Oberflächenbeschaffenheit auf der Orthofotokarte (rechts)	31
Abbildung 8: Vor-Ort-Aufnahme des Beispielgebiet Bahnhofsvorstadt	31
Abbildung 9: Definition der Beispielgebiete Oberlosa 1 (orange), 2a (blau) und 2b (rot) und Oberflächenbeschaffenheit auf der Orthofotokarte (rechts)	32
Abbildung 10: Vor-Ort Aufnahme des Beispielgebietes Oberlosa 1 zeigt große Freiflächen und die beginnenden Bauarbeiten im Hintergrund.....	32
Abbildung 11: Vor-Ort Aufnahme des Beispielgebietes Oberlosa 2a (links) und 2b (rechts).....	32
Abbildung 12: Verbreitung wichtiger Gesteine in Sachsen mit Markierung des Untersuchungsgebietes Plauen (LfULG, 2023).....	34
Abbildung 13: Übersicht der regionalen Einheiten des Grundgebirgsstockwerks mit Markierung des Untersuchungsgebietes Plauen (LfULG; Stand 21.10.2024)	35
Abbildung 14: Online-Portal iDA mit der Karte der geologischen Einheiten (Oberflächenkarte) im Gebiet Plauen. Die Pfeile zeigen die Standorte der Beispielgebiete an (SMEKUL, 2024) .	36
Abbildung 15: verwendete Bohrungen	37
Abbildung 16: Standortbasierter Bericht zur Machbarkeit von geothermischen Systemen für das Beispielgebiet Bahnhofsvorstadt	41
Abbildung 17: Lokalisierung der Thermal Response Tests und der Temperaturprofile in der Umgebung von Plauen und im Umkreis von 5 km	43
Abbildung 18: Beispiel für Temperaturprofilmessungen (T-Log), die den Einfluss des Grundwasserflusses (blaue Pfeile) zeigen.....	44
Abbildung 19: Darstellung mehrerer Temperaturprofilmessungen (T-Log)	45
Abbildung 20: Geologisches 3D-Modell der Beispielgebiete.....	46
Abbildung 21: Geologisches 3D-Modell des Beispielgebiets Rückert Campus	49
Abbildung 22: Geologisches 3D-Modell des Beispielgebiets Bahnhofsvorstadt.....	50
Abbildung 23: Tektonische Strukturen um die Beispielgebiete Rückert Campus und Bahnhofsvorstadt.....	51
Abbildung 24: Tektonische Struktur um die Oberlosa-Beispielgebiete 1, 2a und 2b	53
Abbildung 25: Geologisches 3D-Modell des Beispielgebiets Oberlosa.....	54
Abbildung 26: Konstruktion eines 1D-Temperaturmodells	55

Abbildung 27: Funktionsprinzip Wärmepumpe.....	56
Abbildung 28: Abhängigkeit COP von der Quelltemperatur einer realen Luftwärmepumpe (Carrier) ...	58
Abbildung 29: Schematische Darstellung des Einflusses der Sondenregeneration auf die Untergrundtemperatur	59
Abbildung 30: Linearisiertes Modell zur Grobdimensionierung der Rückkühler	64
Abbildung 31: Schematische Einbindung Rückkühler in die Geothermie und die Wärmeerzeugung	64
Abbildung 32: Möglichkeiten Betriebsweisen Rückkühler, schematisch	65
Abbildung 33: Jahresverlauf der Quelltemperatur Geothermie und der Außentemperatur	66
Abbildung 34: Beispiel Wärmelastgang	67
Abbildung 35: Jahresverläufe der mittleren Fluidtemperatur über 50 Jahre bei Teilregeneration.....	68
Abbildung 36: Einfluss der Entwicklung der Fluidtemperaturen und dem Strombezug der zentr. WP..	69
Abbildung 37: Regenerationssysteme: spezifische Wärmekosten verschiedener Wärmequellen.....	71
Abbildung 38: Klassifizierung von Kältemitteln in Anlehnung an ISO 817	73
Abbildung 39: Jahresdauerlinie - monovalente Betriebsweise	74
Abbildung 40: Jahresdauerlinie - bivalent-alternative Betriebsweise	75
Abbildung 41: Jahresdauerlinie - bivalent-teilparallele Betriebsweise	76
Abbildung 42: Jahresdauerlinie - parallele Betriebsweise.....	76
Abbildung 43: Netz-Typen zur Verteilung von WP-Wärme in Quartieren (Temperaturen beispielhaft) .	79
Abbildung 44: Prinzipien der Wärmeübergabe.....	82
Abbildung 45: Plattenheizkörper: Bauformen	83
Abbildung 46: Heizkörperaustausch und Auswirkungen auf die Niedertemperaturtauglichkeit eines Beispielgebäudes	88
Abbildung 47: Arten der Warmwasserbereitung mittels Wärmepumpen	89
Abbildung 48: Gebäudemodell als Grundlage für die energetische Bewertung und Simulation (Gebäudehülle).....	91
Abbildung 49: Schema der Lastgangiteration zur Approximierung der Untergrund- / Fluidtemperaturen	92
Abbildung 50: COP der simulierten Wärmepumpen in Abhängigkeit des Temperaturhubes.....	92
Abbildung 51: Außentemperaturverlauf Plauen im Jahr 2022	93
Abbildung 52: Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefen und Monaten	94
Abbildung 53: Gasverbräuche der Rückert Schule (Screenshot INM Management)	97
Abbildung 54: Annahme des Jahresverlaufs der Soll-Raumtemperatur	98
Abbildung 55: Ferienkalender.	98
Abbildung 56: Simulierter Wärmebedarf der Rückert Oberschule	99
Abbildung 57: Jahresdauerlinie Rückert Oberschule monovalent.....	99
Abbildung 58: Regenerationsleistung Rückert Oberschule monovalent	100
Abbildung 59: Rückkühler Betriebsdaten Rückert Oberschule monovalent	100
Abbildung 60: Jahresdauerlinie Rückert Oberschule bivalent	101
Abbildung 61: Simulierte Wärmebedarfe der Rückert Grundschule	102

Abbildung 62: Jahresdauerlinie Rückert Grundschule monovalent.....	102
Abbildung 63: Regenerationsleistung Rückert Grundschule monovalent	103
Abbildung 64: Rückkühler Betriebsdaten Rückert Grundschule monovalent	103
Abbildung 65: Jahresdauerlinie Rückert Grundschule bivalent	104
Abbildung 66: Simulierter Wärmebedarf des Hortgebäudes Rückert	104
Abbildung 67: Jahresdauerlinie Rückert Hortgebäude monovalent.....	105
Abbildung 68: Regenerationsleistung Rückert Hortgebäude monovalent	106
Abbildung 69: Rückkühler Betriebsdaten Rückert Hortgebäude monovalent	106
Abbildung 70: Jahresdauerlinie Rückert Hortgebäude bivalent	107
Abbildung 71: Leistungen und Wärmemengen monovalente Versorgung	107
Abbildung 72: Rückkühler Betriebsdaten Rückert Campus gesamt monovalent.....	108
Abbildung 73: Leistungen und Wärmemengen monovalente Versorgung	108
Abbildung 74: 3D-Photovoltaik-Simulation Rückert Campus	109
Abbildung 75: 3D-Photovoltaik-Simulation Rückert Oberschule	110
Abbildung 76: 3D-Photovoltaik-Simulation Rückert Grundschule.....	110
Abbildung 77: Photovoltaik Jahres-Erzeugungslastgang Rückert Grundschule	111
Abbildung 78: Schulhof im Beispielgebiet Rückert Campus.....	113
Abbildung 79: Definition der Freifläche für die Erdwärmenutzung im Beispielgebiet Rückert Campus	113
Abbildung 80: Konservative Betrachtung möglicher Bohransatzpunkte am Rückert Campus mit 8 m Abstand.....	114
Abbildung 81: Mögliche Trassierung Rohrleitung Rückert Campus (weiße Linie)	114
Abbildung 82: Transmissionswärmeverluste Rohrleitung Rückert Campus.....	115
Abbildung 83: Qualitativer Vergleich - zentrale und dezentrale Wärmeversorgung Rückert Campus .	115
Abbildung 84: Varianten Wärmeversorgung Rückert Campus.....	116
Abbildung 85: Verteilung der Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Tiefenstufen im Beispielgebiet Rückert Campus	118
Abbildung 86: Abgrenzung des Modellgebietes Rückert Campus.	121
Abbildung 87: 3D-Modell des Untersuchungsgebietes mit Darstellung der Modell-Layer (links) sowie der Vermaschung im Sondennahbereich (rechts).	123
Abbildung 88: Isolinien der Temperaturdifferenz im 50. Betriebsjahr für das Modell Rückert Campus.	124
Abbildung 89: Temperaturschnitt durch das Sondenfeld (Modell Rückert Campus).	124
Abbildung 90: Anlagenschema Wärmeversorgung Bestand Rückert Grundschule	125
Abbildung 91: Skizze Aufstellplan Heizraum Rückert Grundschule	126
Abbildung 92: Anlagenschema Optimierte Wärmeversorgung Rückert Grundschule.....	127
Abbildung 93: Mögliche Aufstellorte für Rückkühler auf dem Rückert Campus	128
Abbildung 94: Optimierung der Größe der PV-Anlage auf Gesamtkosten.....	129
Abbildung 95: Rückert Campus: Energieflussschema (Ergebnisse der Simulation)	130

Abbildung 96: Investitionskosten Wärmeversorgung Rückert Campus.....	130
Abbildung 97: Betriebskosten Wärmeerzeugung Rückert Campus.....	131
Abbildung 98: Erzeugung der Datengrundlage und Einteilung in Gebäudetypen	133
Abbildung 99: Grafische Oberfläche des THERMOS-Tools.....	134
Abbildung 100: Verteilung der Erdwärmesonden im Beispielsgebiet Bahnhofsvorstadt einschließlich ihrer Zuordnung zu den Grundstückseigentümern.....	138
Abbildung 101: Ausgewiesene Hohlraumgebiete nach dem Oberbergamt (braune Flächen) und nach der Ampelkarte des GeoPLASMA-Projekts (grüne Flächen), einschließlich der EWS nach Grundstückseigentümern.....	139
Abbildung 102: „HeatMap" - Wärmebedarfe und- potenziale in der Bahnhofsvorstadt	143
Abbildung 103: Gebiets-Clusterung der Bahnhofsvorstadt	144
Abbildung 104: IST-Heizwärmebedarf: Bahnhofsvorstadt-Ost	145
Abbildung 105: IST-Heizwärmebedarf: Bahnhofsvorstadt-West.....	145
Abbildung 106: IST-Heizwärmebedarf: Bahnhofsvorstadt-Süd	146
Abbildung 107: Bestands-Wärmeversorgung (Gesamtquartier).....	146
Abbildung 108: Fernwärme-Netz im Untersuchungsgebiet: Primärnetz (rot), Sekundärnetz (orange) Gebäude mit dezentraler Wärmeversorgung (schwarz eingerahmt)	147
Abbildung 109: Variantenüberblick Bahnhofsvorstadt	152
Abbildung 110: Funktionsschema Niedertemperaturnetz mit Energiezentralen und Erdwärmesondenfeldern.....	153
Abbildung 111: Vorlauftemperatur NT-Netz und Begrenzung der WP auf 50°C.....	154
Abbildung 112: Niedertemperaturnetz: Temperaturen am Erzeuger und am Verbraucher	154
Abbildung 113: Nutzungsprüfung Bestands-Fernwärmenetz.....	156
Abbildung 114: Ergebnis der Querschnittsüberprüfung	156
Abbildung 115: Hochtemperaturnetz mit dezentralen WP-Anlagen	157
Abbildung 116: Funktionsschema Kalt-Netz mit Verbrauchern und Erdwärmesondenfeldern.....	158
Abbildung 117: Entwurf Kalt-Netz (blau) mit Anbindeleitungen an EWS-Schächte (grün)	160
Abbildung 118: Bahnhofsvorstadt, Variante 3: dezentrale Wärmeerzeuger und Temperaturen in °C ...	160
Abbildung 119: Methodik typenweise Lastgangerstellung für Wärme und Elektrizität	163
Abbildung 120: Simulierter Wärmebedarfs-Lastgang des Bahnhofsquartiers, Teilgebiet Ost.....	164
Abbildung 121: Verteilung der Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Tiefenstufen im Beispielsgebiet Bahnhofsvorstadt	166
Abbildung 122: Abgrenzung für das Modellgebiet Stadtquartier Bahnhofsvorstadt.	169
Abbildung 123: 3D-Darstellung des Modells Bahnhofsvorstadt mit Darstellung der Modell-Layer.....	171
Abbildung 124: Entwicklung der mittleren Sondenfluidtemperatur für die Subsondenfelder der Bahnhofsvorstadt.	172
Abbildung 125: Isolinien der Temperaturdifferenz im 30. Betriebsjahr für das Modell Bahnhofsvorstadt.	173
Abbildung 126: Bahnhofsquartier: NT-Netz (orange) inkl. FW-Anbindung (rot)	175
Abbildung 127: Bahnhofsvorstadt: Energieflussschema (Ergebnisse der Simulation)	177

Abbildung 128: Bahnhofsvorstadt: Jahresbilanz genutzte Umweltwärme und erzeugte Wärme	177
Abbildung 129: Bahnhofsvorstadt: Investitionskosten der Vorzugsvariante (Variante 1) mit und ohne BEW-Förderung	178
Abbildung 130: Bahnhofsvorstadt: Variante 1 (Vorzugsvariante) Investitions- und Betriebskosten	180
Abbildung 131: Betrachtung der unbenutzbaren Fläche der Beispielgebiete Oberlosa.	186
Abbildung 132: Oberlosa: Variantenüberblick.....	190
Abbildung 133: Oberlosa, Variante 1: Funktionsschema	190
Abbildung 134: Oberlosa, Variante 2: Funktionsschema	191
Abbildung 135: Oberlosa, Variante 3: Funktionsschema	192
Abbildung 136: Verteilung der Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Tiefenstufen im Beispielsgebiet Oberlosa 1	194
Abbildung 137: Verteilung der Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Tiefenstufen im Beispielsgebiet Oberlosa 2a	195
Abbildung 138: Verteilung der Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Tiefenstufen im Beispielsgebiet Oberlosa 2b	196
Abbildung 139: Erdwärmesondenfelder in den Beispielgebieten Oberlosa 1 (links) und 2a (rechts)...	198
Abbildung 140: Darstellung Erdärmesondenfeld in dunkelgrün, Beispielgebietes Oberlosa 2b.	199
Abbildung 141: Mittlere Fluidtemperatur über die Betriebslaufzeit von 50 Jahren in Oberlosa 2b.	200
Abbildung 142: 3D-Modell des Untersuchungsgebietes mit Darstellung der Modell-Layer sowie der Vermaschung im Sondennahbereich.....	202
Abbildung 143: Isolinien der Temperaturdifferenz im 50. Betriebsjahr, Modell Oberlosa 2a.	203
Abbildung 144: Bilanzgrenze der technischen Dimensionierung	203
Abbildung 145: Schematisches Vorgehen zur Dimensionierung der technischen Komponenten	204
Abbildung 146: Oberlosa: Energieflussschema (Ergebnisse der Simulation)	206
Abbildung 147: Fluidtemperatur Entwicklung über 50 Jahre - Jahresmittelwerte	207
Abbildung 148: Fluidtemperatur Entwicklung über 50 Jahre - Jahresmittelwerte Bedarfsgewichtet .	208
Abbildung 149: Strombezüge / Jahresarbeitszahlen Entwicklung über 50 Jahre	209
Abbildung 150: Oberlosa, Variante 3: Investitionskosten mit und ohne BEW-Förderung.....	211
Abbildung 151: Oberlosa: spezifische Investitionskosten Geothermie, je Teilgebiet.....	212
Abbildung 152: Oberlosa, Variante 3: Investitions- und Betriebskosten	213
Abbildung 153: Modellgebiet mit Darstellung der im Modell angenommenen fiktiven Grundwasserdynamik.....	217
Abbildung 154: Temperaturschnitt durch das Sondenfeld für das fiktive Grundwasserströmungsmodell.....	218
Abbildung 155: Isolinien der Temperaturdifferenz im 50. Betriebsjahr für das fiktive Grundwasserströmungsmodell (nur Heizen).	219
Abbildung 156: Entwicklung der mittleren Sondenfluidtemperatur über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren für das Sondenfeld Rückert Campus mit und ohne Grundwasserströmung.	219
Abbildung 157: Fahnenvergleich der durchgeführten 3D-Simulationen	221

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abschätzung geologischer Schichtenabfolge für das Beispielgebiet Rückert Campus und Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit sowie Wärmekapazität des Untergrundes.....	37
Tabelle 2: Abschätzung geologischer Schichtenabfolge für das Beispielgebiet Bahnhofsvorstadt und Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit sowie Wärmekapazität des Untergrundes.....	38
Tabelle 3: Abschätzung geologischer Schichtenabfolge für das Beispielgebiet Oberlosa und Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit sowie Wärmekapazität des Untergrundes.....	38
Tabelle 4: Ergebnisse von Forschungsprojekten, die die Grundlage für die Analyse der thermischen Eigenschaften und Temperaturbedingungen der Gesteinsumgebung des Untersuchungsgebiets bilden	40
Tabelle 5: Zusammenfassung der Datengrundlage für die Analyse der thermischen Eigenschaften und Temperaturbedingungen der Gesteinsumgebung	40
Tabelle 6: Vergleich der Gesteinswärmeleitfähigkeit der Beispielgebiete aus Literaturwerten und GeoPLASMA-CE.....	41
Tabelle 7: Zusammenfassende Tabelle der Ergebnisse der Thermal Response Tests und der Temperaturprofilmessungen im Raum Plauen und im Umkreis von 5 km	42
Tabelle 8: Wärmeleitfähigkeiten der Schichten aus dem Projekt GeoPLASMA-CE	47
Tabelle 9: Entwicklung und Einfluss der Fluidtemperatur über 50 Jahre	69
Tabelle 10: Vergleich von Umweltwärmequellen zur Regeneration von Erdwärmesonden	70
Tabelle 11: Beispieldatenblatt: Heizkörperleistung.....	85
Tabelle 12: Clusterung der Gebäude anhand der Niedertemperaturtauglichkeit.....	87
Tabelle 13: Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen	94
Tabelle 14: Technische Daten Rückkühler (Beispielgerät).....	111
Tabelle 15: Möglichkeiten zur Erdwärmenutzung für Rückert Campus	112
Tabelle 16: Mittelwerte, Minima und Maxima der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Tiefenstufen im Beispilsgebiet Rückert Campus, gerundet.....	118
Tabelle 17: Temperaturprofil des Beispielgebiets Rückert Campus gemäß dem konstruierten linearen 1D-Modell	119
Tabelle 18: Varianten der geothermischen Dimensionierung des Beispielgebietes Rückert Campus.	120
Tabelle 19: Stratigraphische und lithologische Gliederung des Modells Rückert Campus und zugeordnete Modellkörper.	122
Tabelle 20: Hydrogeologische und geothermische Eigenschaften der Modelleinheiten für das Modell Rückert Campus.	122
Tabelle 21: Heizwärmebedarf Bahnhofquartier	135

Tabelle 22: Möglichkeiten zur Erdwärmenutzung für Bahnhofsvorstadt.....	137
Tabelle 23: Anzahl der geothermischen Bohrungen im Beispielgebiet Bahnhofsvorstadt.....	139
Tabelle 24: Anzahl der maximalen Anzahl von EWS, außerhalb Hohlraumgebieten im Beispielgebiet Bahnhofsvorstadt (entsprechend Abbildung 101)	140
Tabelle 25: Leistungskennndaten Rückkühler (Planungsgrundlage).....	141
Tabelle 26: Heizwärmebedarf Bahnhofsvorstadt (IST-Zustand). Unterteilung nach Lage und Nutzungstypisierung.....	144
Tabelle 27: Formular: Voruntersuchung des Bestands-Fernwärmenetzes	148
Tabelle 28: Perspektivischer Wärmebedarf Bahnhofsvorstadt	149
Tabelle 29: Gebietsweise Gegenüberstellung von Wärmebedarf und geothermischem Potenzial in MWh/a.....	151
Tabelle 30: Maßnahmen zur Weiternutzung des Bestandsnetzes	155
Tabelle 31: Variantenvergleich Bahnhofsvorstadt	161
Tabelle 32: Bahnhofsvorstadt: Erfüllungsszenario 75 % EE mit Fernwärme	162
Tabelle 33: Jahressummen zur Lastganggenerierung	163
Tabelle 34: Temperaturprofil des Beispielgebiets Bahnhofsvorstadt gemäß dem konstruierten linearen 1D-Modell.....	165
Tabelle 35: Mittelwerte, Minima und Maxima der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Tiefenstufen im Beispielsgebiet Bahnhofsvorstadt	165
Tabelle 36: Dimensionierungsergebnisse des Sondenfeldes Bahnhofsvorstadt für verschiedene Tiefenstufen ohne Regeneration für eine monovalente Energieversorgung	167
Tabelle 37: Dimensionierungsergebnisse des Sondenfeldes Bahnhofsvorstadt bei 300 m, 50 %-ige Regeneration, monovalente Energieversorgung.....	168
Tabelle 38: Dimensionierungsergebnisse des Sondenfeldes Bahnhofsvorstadt bei 300 m, 50 %-ige Regeneration, bivalente Energieversorgung	168
Tabelle 39: Energetische Randbedingungen der Subsondenfelder.	169
Tabelle 40: Stratigrafische und lithologische Gliederung des Modells Bahnhofsvorstadt und zugeordnete Modellkörper.	170
Tabelle 41: Hydrogeologische und geothermische Eigenschaften der Modelleinheiten für das Modell Bahnhofsvorstadt.	170
Tabelle 42: Variante 1: Dimensionierung der Komponenten je Energiezentrale	175
Tabelle 43: Dimensionierung Rückkühlwerke	176
Tabelle 44: Datengrundlage (Quelle: Stadt Plauen)	182
Tabelle 45: Oberlosa: Annahmen zur Flächennutzung	183
Tabelle 46: Oberlosa: Annahmen Heiz- und Kühlbedarf	184

Tabelle 47: Zusammenfassende Tabelle der Möglichkeiten zur Erdwärmenutzung für einzelne Beispielgebiete.....	185
Tabelle 48: Anzahl der maximalen Erdwärmesonden in den Beispielgebieten Oberlosa 1, 2a und 2b mit 9 m Sondenabstand.....	186
Tabelle 49: Oberlosa Zusammenfassung der Potenzialanalyse	188
Tabelle 50: Oberlosa Heiz-Kühlbedarf	189
Tabelle 51: Mittelwerte, Minima und Maxima der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Tiefenstufen im Beispielsgebiet Oberlosa 1	194
Tabelle 52: Mittelwerte, Minima und Maxima der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Tiefenstufen im Beispielsgebiet Oberlosa 2a	194
Tabelle 53: Mittelwerte, Minima und Maxima der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Tiefenstufen im Beispielsgebiet Oberlosa 2b	195
Tabelle 54: Temperaturprofil der Beispielgebiete Oberlosa gemäß dem konstruierten linearen 1D- Modell	196
Tabelle 55: Zusammenfassung der erdseitigen energetischen Kennwerte für die Beispielgebiete Oberlosa	197
Tabelle 56: Energetische Randbedingungen der Subsondenfelder	201
Tabelle 57: Stratigrafische und lithologische Gliederung des Modells Oberlosa 2a und zugeordnete Modellkörper	201
Tabelle 58: Hydrogeologische und geothermische Eigenschaften der Modelleinheiten für das Modell Oberlosa 2a	201
Tabelle 59: Oberlosa: Trassenmeter je Teilgebiet	205
Tabelle 60: Oberlosa: Hauptkomponenten Pump- und Regelstationen je Teilquartier.....	206
Tabelle 61: Oberlosa: Entwicklung und Einfluss der Fluidtemperaturen über 50 Jahre	210
Tabelle 62: Oberlosa: Auswertung Investitionskosten Geothermie	211
Tabelle 63: Hydrogeologische und geothermische Eigenschaften der Modelleinheiten für das fiktive Grundwasserströmungsmodell.....	217

Tabellenverzeichnis im Anhang

Tabelle A 1: Wärmeleitfähigkeiten der Schichten aus dem Projekt GeoPLASMA-CE.....	231
Tabelle A 2: Annahmen Oberlosa	240
Tabelle A 3: Berechnungs-Ergebnisse Oberlosa	240

Abkürzungsverzeichnis

1D	eindimensional
3D	dreidimensional
AWG	AWG Wohnungsgenossenschaft Plauen eG
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BEW	Bundesförderung effiziente Wärmenetze
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BVG	Bundesverband Geothermie
CCS	Carbon Capture Storage (CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung)
COP	Coefficient of Performance
EE	Erneuerbare Energien
EED	Earth Energy Designer
EWS	Erdwärmesonde
EZ	Energiezentrale
HGE	Hydrogeologische Einheit
H-VL	Heizungs-Vorlauftemperatur
GEK	geoENERGIE Konzept GmbH
GeotIS	Geothermisches Informationssystem
GeoPLASMA-CE	Geothermal Planning, Assessment and Mapping Strategies in Central Europe
GeoSN	Landesamt für Geobasisinformation Sachsen
JAZ	Jahresarbeitszahl
Kf	Filtrationskoeffizient
LIAG	Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
RL	Rücklauf
SMEKUL	Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft
T-Log	Temperaturprofilmessung
TRT	Thermal Response Test
VL	Vorlauf
WbG	Wohnungsbaugesellschaft Plauen mbH
WP	Wärmepumpe
WÜST	Wärmeübertragerstation
WLF	Wärmeleitfähigkeit
WWB	Trink-Warmwasserbereitung

Glossar

3D-Modell ist eine digitale Darstellung eines Objekts in drei Dimensionen (Höhe, Breite, Tiefe). Im Bereich der geothermischen Projektplanung können mit diesen Modellen die geologischen Strukturen im Untergrund visualisiert und der Grundwasserfluss sowie der Wärmetransport simuliert werden.

Attika ist eine wand- oder mauerartige Erhöhung der Außenwand, die über den Dachrand hinausgeht.

Aquifer (oder Grundwasserleiter) ist ein Bereich in einem lockeren oder festen Gesteinskörper, der mit Grundwasser gefüllt ist und aufgrund seiner hydraulischen Leitfähigkeit in der Lage ist, Grundwasser aufzunehmen, zu speichern und weiterzuleiten.

Brunnenanlage ist ein offenes, geothermisches System, um die thermische Energie des Grundwassers nutzbar zu machen. Die Anlage besteht aus Förderbrunnen, die Grundwasser entnehmen und Schluckbrunnen, in denen das Wasser nach dem Entzug der Wärme wieder in den Grundwasserleiter zurückgeleitet wird.

Erdwärmesonde ist ein vertikal verlaufender Wärmetauscher, der aus in ein Bohrloch eingelassene Kunststoffrohren besteht (geschlossenes System). In Erdwärmesonden zirkuliert eine Wärmeträgerflüssigkeit, welche dem Erdreich Wärme entzieht (Heizbetrieb) oder Wärme zurückgibt (Kühlbetrieb).

Erdwärmekollektor ist ein Wärmetauscher, der aus horizontal im Erdreich verlegten Kunststoffrohren besteht und dem Erdreich Wärme entzieht (geschlossenes System).

FEFLOW ist eine Software zur numerischen Simulation von Grundwasserströmung, Stofftransport und Wärmetransport in porösen und geklüfteten Medien.

Filtrationskoeffizient (K_f) beschreibt im Kontext eines Grundwasserleiters die Fähigkeit des Gesteins oder Sediments, Wasser durch seine Poren oder Klüfte zu leiten. Er ist ein Maß für die Durchlässigkeit des Materials und beeinflusst, wie schnell und effizient Grundwasser durch den Aquifer fließen kann.

Geologisches Modell ist eine dreidimensionale Darstellung des geologischen Untergrunds, die auf Daten aus geologischen Karten, Bohrungen und geophysikalischen Messungen basiert. Die räumlichen Beziehungen und Eigenschaften von Gesteinsschichten und geologischen Strukturen können visualisiert und analysiert werden.

GeoPLASMA-CE steht für "Shallow Geothermal Energy Planning, Assessment and Mapping Strategies in Central Europe". Es handelt sich dabei um ein Interreg gefördertes EU-Projekt, das darauf abzielte, die Nutzung von oberflächennaher Geothermie für Heizung und Kühlung in Mitteleuropa zu fördern.

Geothermische Energie, oder auch Erdwärme, ist die in Form von Wärme gespeicherte Energie im Erdinneren (innerhalb der Erdkruste).

Geothermische Dimensionierung ist der Prozess der Planung und Optimierung des Layouts des unterirdischen Teils der geothermischen Anlage (bis zum Anschlusspunkt der Wärmepumpe oder dem Netzeingang), um eine Deckung des Wärme- bzw. Kältebedarfs mit gleichzeitig minimalen Kosten unter Berücksichtigung des Umweltschutzes zu erreichen.

Geothermisches Modell ist eine dreidimensionale Darstellung der geothermischen Eigenschaften und Strukturen im Untergrund. Es wird verwendet, um die Verteilung von Wärmeleitfähigkeit, Temperatur und Wärmestrom zu visualisieren und zu analysieren.

Geschlossenes System in der oberflächennahen Geothermie besteht aus einem Kreislauf, in dem eine Wärmeträgerflüssigkeit durch z.B. Erdwärmesonden oder Erdwärmekollektoren zirkuliert. Diese Systeme entziehen dem Erdreich Wärme (oder Kälte) und geben sie über einen Wärmetauscher an ein Heiz- (oder Kühlsystem) ab, ohne dass die Flüssigkeit mit dem Erdreich in direkten Kontakt steht.

Grubenwasser ist Wasser, das mit Bergwerken in Kontakt steht. Es kann sowohl aus Grundwasser als auch aus Niederschlagswasser bestehen, das in das Grubengebäude eindringt.

Grundlast ist die durchschnittliche monatliche Leistung, berechnet durch den monatlichen Energieverbrauch, geteilt durch die Anzahl der Betriebsstunden im Monat.

Grundwasser ist Wasser, das sich unterhalb der Erdoberfläche in den Hohlräumen von Gesteinen und Sedimenten befindet. Es entsteht durch das Versickern von Niederschlägen und kann in Grundwasserleitern (Aquiferen) gespeichert und transportiert werden.

Grundwasserleiter siehe Aquifer

Hydrogeologie ist ein Teilgebiet der Geologie, das sich mit dem Vorkommen, der Bewegung und der Verteilung von Grundwasser in den Böden und Gesteinen der Erdkruste befasst. Es untersucht, wie Wasser in den Untergrund gelangt, wie es sich dort bewegt und wie es mit den umgebenden geologischen Materialien interagiert.

Hydrogeologisches Modell ist eine vereinfachte, mathematische Darstellung eines Grundwasserleitersystems, die hilft, den Wasserfluss und die Verteilung von Wasser unter der Erde zu simulieren und zu verstehen. Solche Modelle nutzen geologische Daten, hydraulische Eigenschaften des Untergrunds und hydrologische Prozesse, um Vorhersagen über Wasserbewegungen und mögliche Umweltveränderungen zu treffen.

Jahresarbeitszahl ist eine Kennziffer, die die Effizienz einer Wärmepumpe über ein Jahr beschreibt. Sie gibt das Verhältnis zwischen der erzeugten Heizwärme und der dafür aufgewendeten elektrischen Energie an.

Kältemittel ist eine Flüssigkeit in Wärmepumpen und Kühlsystemen, die Wärme durch einen Phasenwechsel (flüssig zu gasförmig) transportiert.

Lastkurve zeigt den zeitlichen Verlauf des Energiebedarfs für Heizung und Warmwasserbereitung über einen bestimmten Zeitraum. Diese Kurve hilft dabei, den Energieverbrauch zu analysieren und die Effizienz des Systems zu bewerten.

Ein **offenes System** in der oberflächennahen Geothermie nutzt Grundwasser als Wärmeträger, das aus einem Brunnen entnommen und nach der Wärmeentnahme wieder in den Untergrund zurückgeführt wird.

Quelltemperatur ist die Untergrundtemperatur entlang der Erdwärmesonde.

Die **Regeneration** des Untergrundes beschreibt das Einbringen von Wärme in den Boden, um eine thermische Balance zu erreichen. Da sich der Untergrund bei der Nutzung geothermischer Wärme abkühlt, wird er in den Sommermonaten durch Abwärme aus der Gebäudekühlung oder Solarthermie-Anlagen wieder aufgeheizt.

Spitzenlast ist maximale Wärmeeintrags- oder Wärmeentzugsleistung.

Bei der **technischen Dimensionierung** wird der oberirdische Teil der Geothermieanlage (ab der Wärmepumpe oder dem Netzeingang) so ausgelegt und optimiert, dass der Wärmebedarf gedeckt und die Kosten minimiert werden.

Temperaturprofilmessung ist der Prozess der Erfassung von Temperaturen innerhalb eines Bohrlochs bis zu dessen Endteufe (z.B. innerhalb der Erdwärmesonde). Die Messung dient zur Bestimmung der unbeeinflussten Untergrundtemperatur und zur Überwachung des Einflusses von geothermischen Anlagen auf die Umgebung.

Thermal Response Test ist ein vor Ort durchgeführtes Messverfahren, das die thermischen Eigenschaften des Untergrunds sowie die Wärmeübertragungseigenschaften des im Boden installierten Wärmeübertragers bestimmt (i.d.R. Erdwärmesonden).

Wärmequelle im Kontext der oberflächennahen Geothermie wird der Bereich beschrieben aus dem die thermische Energie entzogen wird, um sie für Heizung und Kühlung zu nutzen. Diese Energie wird typischerweise aus den oberen Erd- und Gesteinsschichten oder aus dem Grundwasser gewonnen.

Die **Wärmeleitfähigkeit** ist eine Stoffeigenschaft, die den Wärmestrom durch ein Material aufgrund der Wärmeleitung bestimmt. Sie gibt an, wie gut ein Material Wärme transportiert und wird in Watt pro Meter und Kelvin $[W/(m \cdot K)]$ angegeben.

Eine **Wärmepumpe** ist eine Maschine, die thermische Energie aus der Umgebung (Luft, Erde oder Wasser) aufnimmt und diese Energie nutzt, um ein Gebäude zu heizen oder zu kühlen. Sie bringt die Wärme aus der Umwelt mit Hilfe von elektrischer Energie auf ein höheres Temperaturniveau.

Wärmetauscher ist eine Vorrichtung, die thermische Energie von einem Stoffstrom auf einen anderen überträgt, ohne dass die beiden Stoffströme sich vermischen.

Wärmeträgerflüssigkeit (auch Solefluid) wird in Geothermieanlagen (z.B. Erdwärmesonden) verwendet, um die im Erdreich gespeicherte Wärme zu transportieren. Diese Flüssigkeit zirkuliert in einem geschlossenen Kreislauf und überträgt die Wärme von der Erde zur Wärmepumpe, die sie dann für Heizzwecke nutzbar macht. Im Gegenteil zum Kältemittel findet kein Phasenübergang zum Wärmetransport statt.

Wärmetransport ist der Prozess, bei dem thermische Energie von einem Ort höherer Temperatur zu einem Ort niedrigerer Temperatur übertragen wird.

Wärmeübertragerstation ist eine technische Einrichtung, die die Wärme eines Fern- oder Nahwärmenetzes in das Wärmeverteilungssystem des Verbrauchers überträgt. Sie stellt sicher, dass die erforderliche Vorlauftemperatur individuell eingestellt werden kann und umfasst Komponenten wie Wärmetauscher, Regler und Ventile.

1 Motivation und Zielstellung

Die Nutzung oberflächennaher Geothermie zur Beheizung und Temperierung von Gebäuden ist heute in Sachsen eine etablierte Alternative zu herkömmlichen Heiz- und Kühlsystemen. Alle Großstädte und Kommunen in Deutschland stehen vor der Herausforderung der Wärmewende. Neben zentralen Versorgungslösungen kann die Integration oberflächennaher Geothermie als technisch ausgereifte Option in dezentralen Einzellösungen und Netzen einen wesentlichen Beitrag im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung leisten. Dies ermöglicht es den Kommunen, die lokale Wertschöpfung zu steigern, ihre Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu verringern und gleichzeitig zum Klimaschutz beizutragen. Besonders in städtischen Randgebieten, in denen eine Fernwärmeanbindung nicht realisierbar ist, spielt die oberflächennahe Geothermie bereits heute eine entscheidende Rolle für die Deckung des Wärme- und Kühlbedarfs und wird zukünftig zentraler Baustein in deren Wärmeversorgungskonzept sein.

Geothermie bietet eine zuverlässige, nachhaltige und kosteneffiziente Wärmequelle für Wärmenetze, die zur Grundlastversorgung, Dekarbonisierung, Effizienzsteigerung und Flexibilität beiträgt. Auch in Sekundärnetzen von Fernwärmesystemen kann die oberflächennahe Geothermie zunehmend eingesetzt und sinnvoll mit anderen Energiequellen kombiniert werden. Da im Sommer der Wärmebedarf auf eine geringe Grundlast sinkt, können überschüssige Wärmemengen im Fernwärmeverbundsystem aus regenerativen Quellen und Abwärme genutzt werden, um Erdwärmesondenfelder und deren umliegenden Untergrund thermisch zu regenerieren. Diese gespeicherte Wärme kann wiederum in den Wintermonaten genutzt und damit die Effizienz großer Erdwärmesysteme signifikant gesteigert werden. Mit ihrem Potenzial zur CO₂-Einsparung und der Möglichkeit zur flexiblen Erweiterung der Wärmenetze ist die oberflächennahe Geothermie eine attraktive Option für Kommunen, die eine effiziente, nachhaltige und umweltfreundliche Wärmeversorgung anstreben.

Ziel der Studie ist es, für drei vorgegebene Quartiersgebiete in und um die Stadt Plauen im Vogtlandkreis verschiedene Möglichkeiten für eine nachhaltige Wärmeversorgung mit erneuerbaren Energien unter Nutzung von Erdwärme aufzuzeigen. Die drei ausgewählten Gebiete weisen unterschiedliche Charakteristika in Bezug auf Gebäudebestand, Nutzungsform, Energiebedarf und Versorgungsinfrastruktur auf, weshalb verschiedene Möglichkeiten der nachhaltigen Wärmeversorgung mit erneuerbaren Energien verglichen wurden.

Als Grundlage der Arbeiten erfolgten Recherchen, Vor-Ort-Begehungen und Ist-Stands-Analysen der einzelnen Quartiere. Anschließend wurden geothermische Machbarkeitsstudien durchgeführt, und die jeweils möglichen Erschließungsmethoden wie oberflächennahe und mitteltiefe Erdwärmesonden,

Erdwärmekollektoren oder Energiepfähle, untersucht. Dabei wurden fachgerechte Anlagendimensionierungen sowie 3D-Modellierungen der thermischen Effekte auf den Untergrund durchgeführt. Zudem wurden Kostenanalysen erstellt und die derzeit bestehenden Fördermöglichkeiten für die Vorzugsvarianten einbezogen.

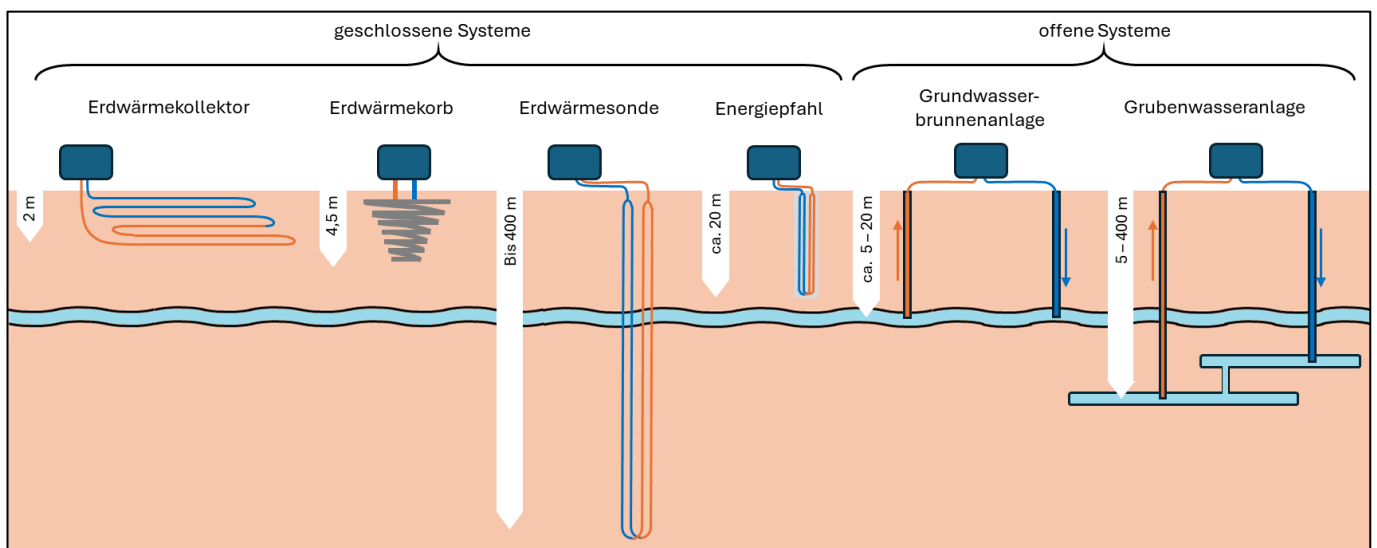
Diese Betrachtungen dienen anschließend als Grundlage für die Erstellung von Handlungsempfehlungen in Form eines Nutzerhandbuches für die nachhaltige Quartiersversorgung mittels Erdwärme sowie deren Kombinationsmöglichkeiten mit weiteren Energieträgern.

Die Arbeiten wurden in enger Abstimmung mit dem Auftraggeber LfULG sowie den Projektpartnern der Stadt Plauen, Fachbereiche Bau und Umwelt sowie Gebäude- und Anlagenverwaltung und dem Energieversorger der Stadt Plauen, der enviaTHERM GmbH durchgeführt.

2 Oberflächennahe geothermische Wärmequellsysteme

Zur Erschließung des Bodenschatzes Erdwärme stehen verschiedene Wärmequellsysteme zur Verfügung, die je nach den standortspezifischen Randbedingungen ausgewählt werden. Die Nutzung von Erdwärme ist möglich, wenn sowohl die natürlichen Gegebenheiten als auch die gesetzlichen Anforderungen und technischen Voraussetzungen erfüllt sind. Dabei ist das übergeordnete öffentliche Interesse in der Betrachtung zu beachten. Die rechtlichen Rahmenbedingungen werden im Zuge des Genehmigungsverfahrens festgelegt, wobei insbesondere Wasser-, Umwelt- und Denkmalschutz oder Schutz von unter- und oberirdischen Gebäuden zu beachten sind. Technische und bauliche Voraussetzungen umfassen insbesondere den Platzbedarf, die Anforderungen an die technische Installation und die Verwendung spezifischer Bauelemente.

Im Folgenden werden die derzeit üblichen sowie zukünftig nutzbaren Erdwärmeerschließungssysteme in Sachsen zusammengefasst. Nach Abstimmung mit den Projektpartnern und dem Auftraggeber wurden folgende Erdwärmenutzungsmöglichkeiten in die Betrachtung einbezogen und für die primäre Bewertung der Anwendbarkeit die entsprechenden Systeme der oberflächennahen Geothermie ausgewählt:



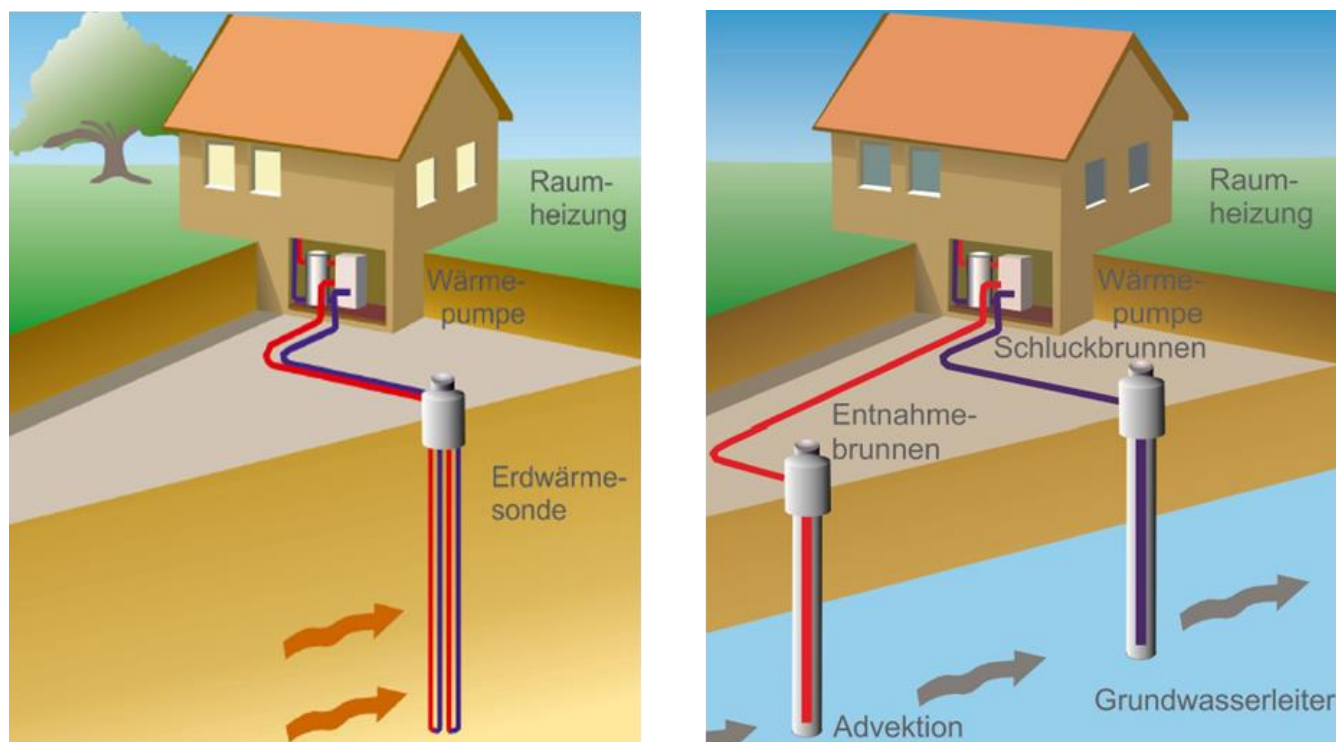
Quelle: nach STBW, 2024

Abbildung 1: Übersicht Einteilung der Erdwärmenutzungen offener und geschlossener Systeme

2.1 Erdwärmesonden

Die am weitesten verbreitete Form der Erdwärmenutzung in Sachsen sind Erdwärmesonden, die bei größeren Projekten zu einem Erdwärmesondenfeld zusammengefasst werden können. Eine Erdwärmesonde ist ein rohrförmiger Wärmetauscher, der in eine meist vertikale Bohrung eingebracht wird (vgl. Abbildung 2). Diese werden in Deutschland in der Regel bis in eine Tiefe von 70 bis 200 m errichtet. Auf

dem Markt sind Erdwärmesonden bis zu einer Länge von 500 m von verschiedenen Herstellern verfügbar. Der Einsatz von Erdwärmesonden kann sowohl für die Wärmequellenerschließung bei bestehenden als auch neuen Gebäuden erfolgen, sofern ausreichend Platz für die Installation vorhanden ist. Die nutzbare Energiemenge, die mittels Erdwärmesonden bereitgestellt werden kann, hängt nicht nur von der Tiefe der Erdwärmesonde, sondern auch von den thermischen Eigenschaften der Umgebung, beispielsweise der effektiven Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität der anstehenden Gesteine sowie auch den Einsatzbedingungen ab. Bei der Verwendung mehrerer Erdwärmesonden ist ein Mindestabstand zwischen den Sonden einzuhalten, der mit zunehmender Sondenlänge zunimmt. In der Regel beträgt dieser zwischen 6 und 10 m (VDI 4640, 2019). Der Sondenabstand ist ein wichtiger Parameter bei der Dimensionierung von Erdwärmesondenfeldern, da die einzelnen Sonden den Untergrund um sich herum beeinflussen und somit mit umliegenden Erdwärmesonden interagieren. Bei reinem Wärmeentzug gilt es diese Interaktion zu minimieren, bei Kühlung, also saisonalem Wärmeeintrag (z. B. durch Abwärme aus Raumtemperierung im Sommer) ist die Interaktion mit dem geologischen Untergrund gewünscht, um einen Speichereffekt zu generieren. Eine fachkundige Planung anhand der Vorgaben und Richtlinien, z.B. der VDI 4640, auf der Grundlage von zuverlässigen Daten sowohl des Untergrundes als auch des Energiebedarfs ist unerlässlich.



Quelle: LFULG, 2023

Abbildung 2: Schematische Darstellung der Erdwärmesonden (links) und einer Grundwasserwärmepumpenanlage (rechts)

2.2 Grundwasserwärmepumpen

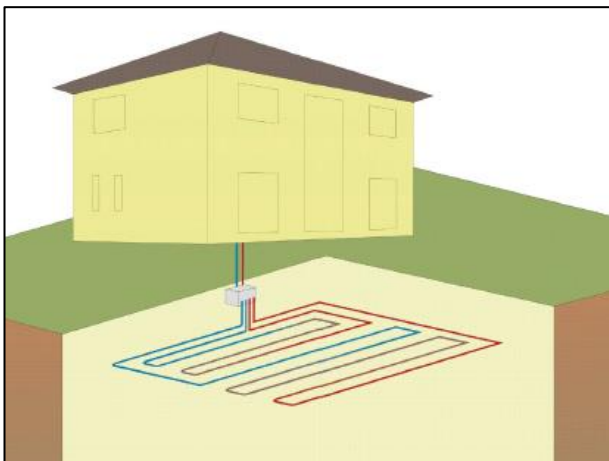
Bei der Nutzung von Grundwasserwärmepumpen handelt es sich um ein offenes System, bei dem das Grundwasser als Wärmequelle genutzt und der Wärmepumpe zugeführt wird. In der Regel werden hierzu zwei oder mehr Brunnen an einem geeigneten Standort niedergebracht. Das Wasser wird aus einem hydraulisch höher gelegenen Brunnen (Förderbrunnen) entnommen und nach Abkühlung in einen hydraulisch tiefer gelegenen Brunnen (Injektions- oder Schluckbrunnen) zurückgeführt. Beide Brunnen müssen sich im selben Grundwasserleiter befinden (vgl. Abbildung 2). Als Vorteil des Systems ist die sehr hohe mögliche Leistungsentnahme zu nennen, wenn ein entsprechend mächtiger und durchlässiger Grundwasserleiter vorhanden ist. Um eine langfristige und nachhaltige Betriebsweise zu gewährleisten, muss das System eine Reihe von Bedingungen erfüllen. Neben dem Vorhandensein eines ausreichend ergiebigen Grundwasserleiters muss die langfristige Dynamik des gesamten Systems (auf Aquiferebene), insbesondere die Lage und der Abstand der Förder- und Injektionsbrunnen und deren Parameter, in der Planungsphase berücksichtigt werden. Damit wird ein hydraulisch-thermischer Kurzschluss zwischen den Brunnen verhindert (d. h. der Förderbrunnen entnimmt kein Wasser, das bereits abgekühlt ist) und der Injektionsbrunnen ist zudem in der Lage, das gepumpte Wasser kontinuierlich in den Grundwasserhorizont wieder aufzunehmen. Für die Planung des Systems müssen die hydraulischen Parameter des verwendeten Grundwasserleiters bekannt sein, insbesondere seine Größe und Ergiebigkeit, die Tiefe des Grundwasserspiegels und seine zeitlichen Veränderungen. Weiterhin sind die hydraulische Durchlässigkeit, die Richtung des Grundwasserflusses und die hydrochemischen Parameter des Grundwassers von entscheidender Rolle.

Da es sich um ein offenes System handelt, muss zudem die Wechselwirkung der geplanten Anlage mit anderen Grundwassernutzungsanlagen berücksichtigt werden. Ein weiterer Nachteil ist die mögliche Verringerung des Energieverbrauchs im Falle einer Verringerung der Ergiebigkeit der Wasserquelle, z.B. aufgrund eines Absinkens des Grundwasserspiegels während einer längeren Trockenheit oder einer Erhöhung der Entnahmemenge aus anderen Anlagen oder auch durch eine thermische Wechselwirkung mit einem anderen Grundwasserwärmennutzungssystem. Neben einer Fachplanung und umfangreichen Erkundungsarbeiten ist bei offenen Systemen eine regelmäßige Anlagenüberwachung und -wartung unerlässlich, insbesondere um eine Verockerung (Ablagerungen innerhalb des Brunnens) zu verhindern.

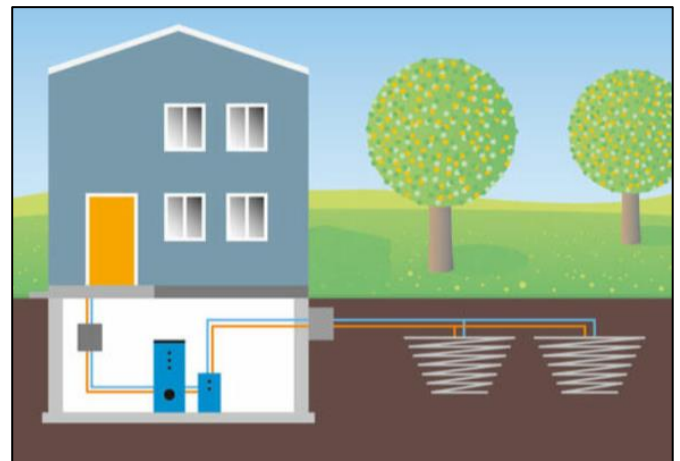
2.3 Erdwärmekollektoren und Erdwärmekörbe

Erdwärmekollektoren sind horizontale Rohrwärmetauscher, die in geringer Tiefe von etwa 1,5 m in Schleifen entweder horizontal liegend oder stehend verlegt werden (vgl. Abbildung 3).

Erdwärmekollektoren haben im Vergleich zu vertikalen Systemen einen großen Platzbedarf. In der Regel benötigen Flächenkollektoren etwa die doppelte Fläche der beheizten Wohnfläche. Bei sehr trockenen, z.B. sandigen Böden mit geringer Wärmekapazität ist der Platzbedarf deutlich höher als bei schweren und feuchten Lehmböden. Nach der Installation des Erdwärmekollektors muss die Oberfläche für Regenwasser durchlässig bleiben, da Niederschlagswasser einen großen Teil der Wärmeenergie liefert. Die Abdeckung des installierten Erdwärmekollektors mit einem Pflaster oder einer anderen undurchlässigen Oberfläche kann demzufolge seine thermische Leistung erheblich verringern. Ein weiterer Teil der Wärmeenergie für Erdwärmekollektoren wird durch Sonneneinstrahlung generiert. Aus diesem Grund ist eine Beschattung beispielsweise durch Bäume, Sträucher oder Gebäude zu vermeiden.



Quelle: LFULG, 2023



Quelle: STMWi, 2024

Abbildung 3: Schematische Darstellung Erdwärmekollektoren (links) und Erdwärmekörbe (rechts)

Der Erdwärmekorb ist eine Sonderform der Kollektorsysteme und ist eine 1,5 bis 3 m hohe spiralförmige Wärmesonde mit konischer Form, die in einer Tiefe von etwa 4,5 m unter der Erdoberfläche angebracht ist. Der Gesamtdurchmesser des Erdwärmekorbes beträgt etwa 2 bis 3 m. Je nach Größe des Korbes variiert die Länge der Austauschrohre zwischen etwa 100 m und 200 m. Der Vorteil des Einsatzes von Erdwärmekörben gegenüber den o.g. flachliegenden Kollektoren liegt in der Nutzung der Untergrundtemperaturen im geringfügig tieferem Erdreich, wobei die Umgebung bei geeigneter Einbautiefe zu Beginn der Heizperiode die höchsten und zu Beginn des Sommers die niedrigsten Temperaturen aufweist. Für die Versorgung relativ kleiner Gebäude, beispielsweise Einfamilienhäuser, ist es in der Regel notwendig, mehrere Erdwärmekörbe einzusetzen. Die Heizleistung der einzelnen Erdwärmekörbe hängt von ihrer Größe ab, kleine Körbe liefern eine Heizleistung von etwa 0,5 kW, größere können bis zu 2 kW erreichen. Der Mindestabstand kleiner Körbe beträgt 4 m, bei größeren Körben muss der Abstand entsprechend größer sein. Wie bei den Erdwärmekollektoren hängt die Entzugsleistung sowie die nutzbare Wärmemenge von der Grundwassersituation und dem Niederschlagseintrag der äußeren Umgebung ab.

2.4 Thermisch aktivierte Bauteile und Energiepfähle

Bei der Planung von Neubauten kann die thermische Aktivierung bestimmter Bauelemente aus Beton und Betonkanälen erfolgen, welche eine Anbindung an das umgebende Erdreich besitzen. Dazu zählen unter anderem Bodenplatten, Schlitzwände, Bohrpfahlwände oder Schachtbauwerke. Vor dem Vergießen der Betonbauteile werden Rohrleitungen eingebaut. Durch diese fließt Wasser, welches als Heiz- und Kühlmedium dient. Die hohen technischen und wirtschaftlichen Kosten für den Bau dieser Elemente schließen ihren Einsatz außerhalb von Neubauten grundsätzlich aus.

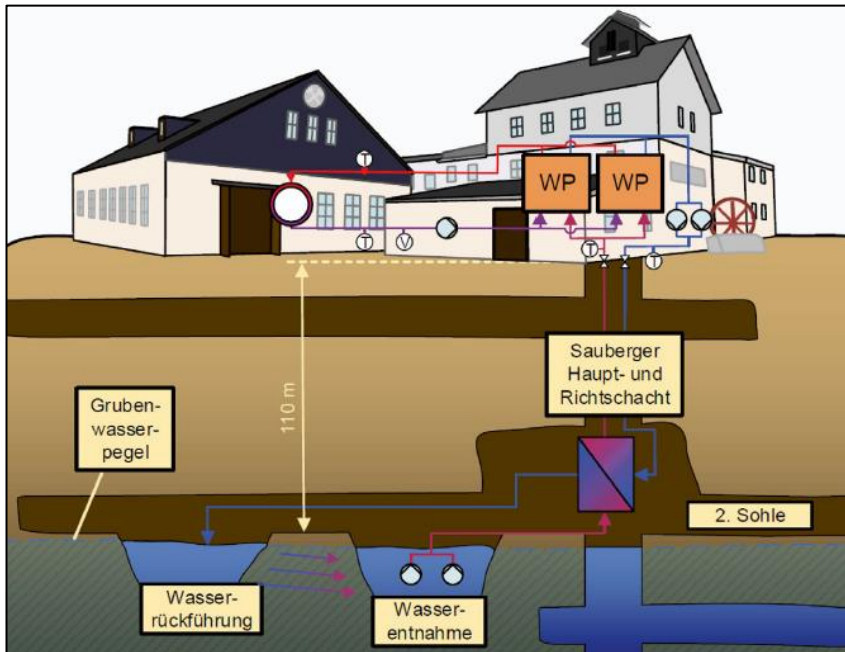
Wenn für die Gründung des Gebäudes aufgrund schwieriger Baugrundverhältnisse oder sehr hoher Lasten eine Tiefgründung verwendet werden muss, kann deren thermische Aktivierung in Betracht gezogen werden. Bei der Verwendung von Gründungspfählen werden Röhrenwärmetauscher vor dem Betonieren eingesetzt. Das so entstandene Bauwerk, das als Energiepfahl bezeichnet wird, hat neben seiner Grundfunktion der Lasteinleitung in den Boden auch die Funktion eines Wärmetauschers. Die Leistung eines thermisch aktivierten Gründungssystems hängt insbesondere von seiner Größe (Anzahl der Pfähle und Tiefe des Fundaments) und dem damit einhergehenden Volumen des Betons ab. Eine Nutzung dieses baulichen Elements ist durch bereits werksfertig montierte Stoßpfähle oder insitu durch Befestigung der Rohrleitungen an Bewehrungskörben möglich. Aufgrund der Kosten für die Pfähle selbst ist es ratsam, sie nur dort einzusetzen, wo sie für den Bau des Gebäudes erforderlich sind.

2.5 Grubenwassernutzung

Die Nutzung von Grubenwasserwärme ist im Wesentlichen ein Spezialfall der Grundwasserwärmege-
winnung. Bergwerke, die unterhalb des Grundwasserspiegels liegen, verfügen oft über ein effizientes Drainagesystem, das in der Lage ist, erhebliche Mengen an Grundwasser zu führen, abzuleiten und zu speichern. Stillgelegte und in Betrieb befindliche Bergwerke können daher eine interessante Quelle für Wärmeenergie sein (Abbildung 4).

Im Allgemeinen gelten für die Nutzung von Grubenwasser als Wärmequelle ähnliche Kriterien und Beschränkungen wie für die Nutzung von Grundwasser (vgl. Kapitel 2.2). Wasser in Bergwerken kann vergleichsweise schnell und über große Entfernungen fließen, daher ist eine genaue Kenntnis des Systems für die Planung essenziell. Kenntnisse über die Chemie des Grubenwassers sind ein wichtiger Faktor für deren Verwendung, da einige Grubenwässer erhebliche Mengen an gelösten Stoffen enthalten, die sich z.B. in Filtern leicht absetzen können. Über die Dauer des Betriebs einer solchen geothermischen Anlage kann sich die Menge der gelösten Stoffe im Grubenwasser ändern, weshalb diese regelmäßig überprüft werden sollten. Auch aus diesem Grund wird das Grubenwasser manchmal mit Hilfe von geschlossenen Wärmetauschern genutzt, die in Bergwerken installiert werden.

Grubenwasser kann bis in große Tiefen und bei Temperaturen zwischen 20-30 °C vorkommen. Die größere Tiefe führt jedoch auch zu höheren Betriebskosten für die Zutage-Förderung des Wassers. Daher ist es vorteilhaft, Grubenwasser zu verwenden, das selbst an die Oberfläche fließt, oder Grubenwasser, das aus anderen Gründen gepumpt werden muss. Die Verwendung von Grubenwasser ist in der Regel nur dann wirtschaftlich, wenn es sich dort befindet, wo auch eine entsprechende Abnehmerstruktur vorhanden ist.



Quelle: LFULG, 2023

Abbildung 4: Schematische Darstellung der Grubenwassernutzung

2.6 Tiefe Erdwärmesonden

Tiefe Erdwärmesonden sind vertikal abgedichtete Wärmetauscher, die in Bohrlöchern von mehr als 400 m bis zu einer Tiefe von etwa 3 km installiert werden. Während sich die Flüssigkeit im äußeren Teil des Kunststoffrohrs abwärts bewegt, erwärmt sie sich durch Konvektion und steigt dann erhitzt im isolierten Innenrohr auf. Tiefe Erdwärmesonden können am Austrittspunkt Temperaturen für eine primäre Wärmerückgewinnung von mehr als 40 °C erreichen. Die Entzugsleistung der betriebenen tiefen Erdwärmesonden (400 m bis 3.000 m Tiefe) kann im höheren zweistelligen bis dreistelligen Kilowattbereich (80 bis 350 kW) bei Wassertemperaturen von 40 °C bis 108 °C liegen (BVG, 2023). Um vor allem bei relativ kurzen Tiefensonden (400 m bis 1.000 m) optimale Heiztemperaturen zu erreichen, bedarf es einer geeigneten geologischen Struktur, insbesondere einer ausreichenden Temperatur der Gesteinsumgebung in diesen Tiefen und eines entsprechenden geothermischen Gradienten. Der Nachteil von tiefen Erdwärmesonden sind die deutlich höheren technischen und finanziellen Kosten der Bohrung.

3 Charakteristik der Beispielquartiere

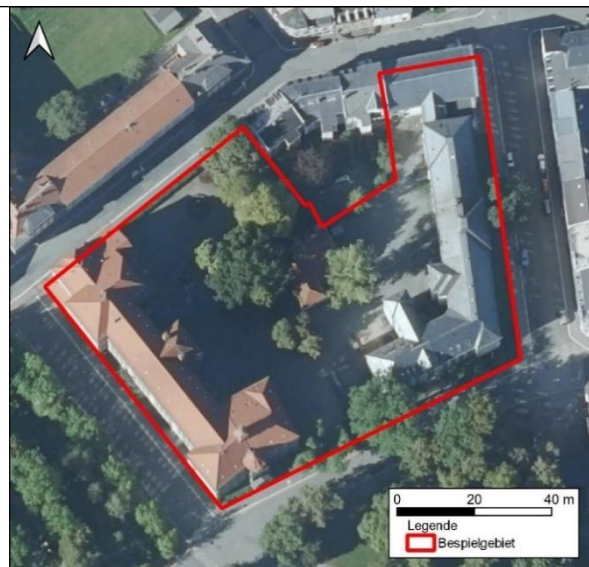
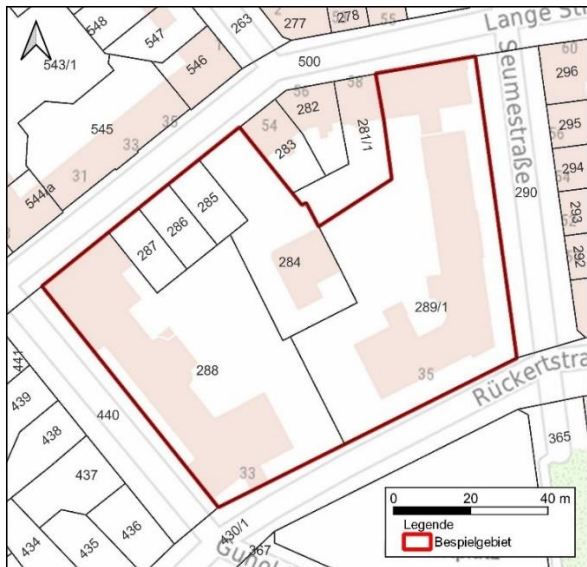
Die Lage und Struktur der Beispielgebiete wurden vom Projektteam des LfULG, sowie den Projektpartnern -der Stadt Plauen und der enviaTHERM GmbH- ausgewählt, um verschiedene Arten von Projekten hinsichtlich der Art der Erschließung und Nutzung zu repräsentieren. Die ausgewählten Gebiete umfassen sowohl bestehende Gebäude als auch geplante Neubaugebiete, die sich nicht nur im direkten Eigentum der Stadt Plauen befinden, sondern auch solche, bei denen die Stadt Plauen bzw. die enviaTHERM GmbH als Wärmeversorger auftreten. Gleichzeitig umfassen die Beispielgebiete verschiedene Objektnutzungen wie Wohn- und Nichtwohngebäude sowie Industriegebäude.

Die Gebietsgrenzen wurden so festgelegt, dass die einzelnen Beispielgebiete weitestgehend funktionale Einheiten bilden. Ziel war es daher, unter Wahrung der Integrität des Gebietes nur die Mindestfläche einzubeziehen, die in der Machbarkeitsstudie bearbeitet wird (entweder als Wärmequelle oder als Verbraucher von Wärmeenergie). Ein weiteres Kriterium war es, die Grenzen der Beispielgebiete so weit wie möglich anhand der Grundstücksgrenzen zu definieren. In diesem Kapitel werden die einzelnen Beispielgebiete und deren konkrete Abgrenzung beschrieben.

Nachfolgend werden die Quartiere (Campus Rückertschule, Bahnhofsvorstadt und Oberlosa) mit ihren Charakteristika einzeln betrachtet.

3.1 Rückert Campus

Das Beispielgebiet "Rückert Campus" steht stellvertretend für die vorhandene historische Stadtbebauung mit dem Nutzungscharakter einer öffentlichen Einrichtung. Der Campus, der sich im nördlichen Teil von Plauen (Stadtteil Haselbrunn) befindet, besteht aus der Grund- und Oberschule "Friedrich Rückert", die einen innenliegenden Schulhof mit hauptsächlich versiegelter Fläche und einem zentral gelegenen kleineren Hortgebäude umgibt. Die Gebäude der Oberschule stehen unter Denkmalschutz. Drei Wohngebäude (Lange Straße 54, 56 und 58) sind ebenfalls Teil des Stadtblocks auf der Nordseite, stehen aber in keinem funktionalen Zusammenhang mit dem Campus. Die Grundstücke, auf denen diese stehen (283, 282, 281/1), wurden daher nicht in das Beispielgebiet einbezogen. Die Abgrenzung des Beispielgebiets auf dem Stadtplan ist in Abbildung 5 mit Flurstückkarte und der Oberflächenbeschaffenheit dargestellt. Abbildung 6 zeigt eine Aufnahme der Oberschule "Friedrich-Rückert" und ein Teil des betonierten Schulhofes.



Quellen: BKG, 2023, GEOSN 2023a

Quellen: BKG, 2023, GeoSN, 2023b

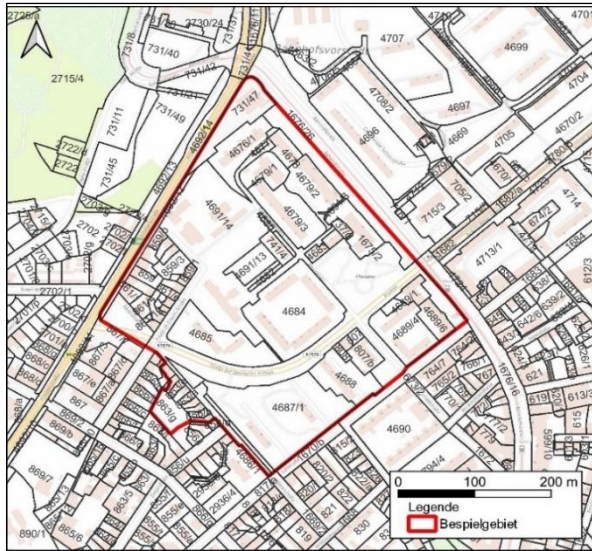
Abbildung 5: Definition des Beispielgebiets Rückert Campus mit Flurstückkarte (links) und Oberflächenbeschaffenheit auf der Orthofotokarte (rechts)



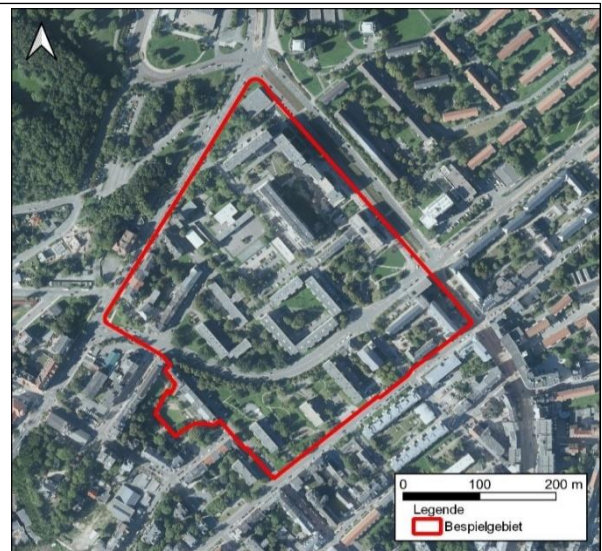
Abbildung 6: Vor-Ort Aufnahme des Beispielgebiets Rückert Campus

3.2 Quartier Bahnhofsvorstadt

Das am Rande des Stadtzentrums gelegene Beispielgebiet Bahnhofsvorstadt ist zum Teil eine klassische Plattenbausiedlung, wie sie in sächsischen Städten vielerorts anzutreffen ist. Das abgegrenzte Gebiet, das mehrere Stadtblöcke umfasst, ist teilweise durch einen gemeinsamen Fernwärmeanschluss verbunden. In dem Gebiet befinden sich Mehrfamilienhäuser in Plattenbauweise der Wohnungsgesellschaften AWG und WbG sowie eine Schule. Zwischen den Häusern befinden sich zum einen Grün- bzw. Parkflächen und zum anderen ist ein erheblicher Teil der Fläche des Beispielgebiets Wege- und Straßenfläche. Im Westen befindet sich eine Gruppe von mehrgeschossigen zum Teil denkmalgeschützten Altbauten einschließlich der dazugehörigen Hinterhöfe (Bärenstraße 21, 23, 25, 27, 29, 31 und 33), die im Hinblick auf den Anschluss an das Fernwärmenetz in das Beispielgebiet einbezogen werden. Die Abgrenzung des Beispielgebiets ist in der Abbildung 7 dargestellt. Abbildung 8 zeigt beispielhaft die aktuelle Bebauung am Standort.



Quellen: BKG, 2023, GEOSN, 2023a



Quellen: BKG, 2023, GEOSN, 2023b

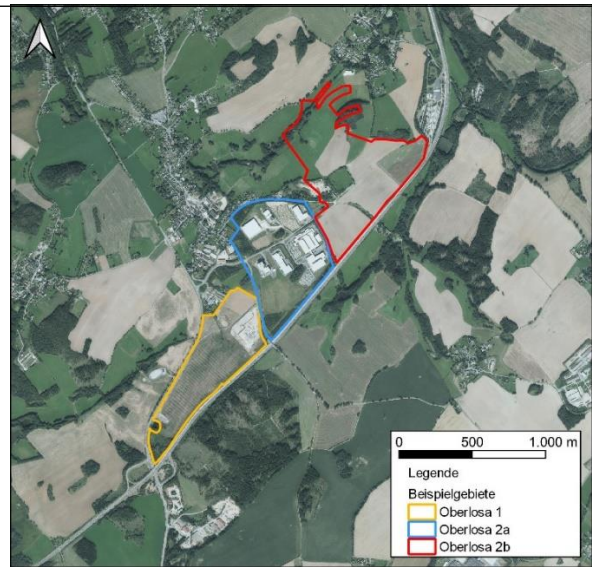
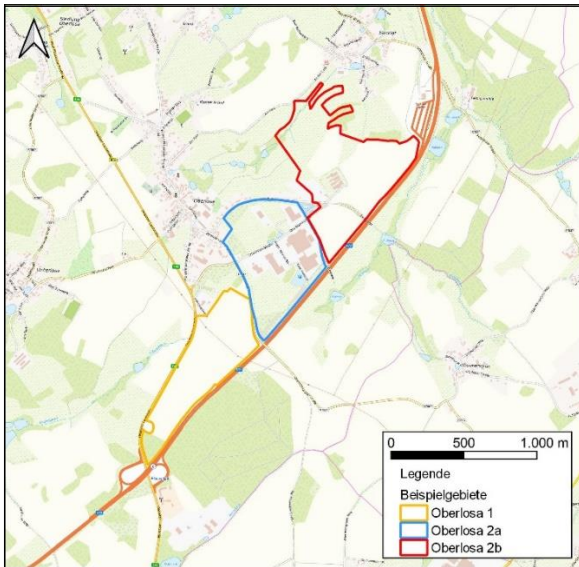
Abbildung 7: Definition des Beispielgebiets Bahnhofsvorstadt mit Flurstückkarte (links) und Oberflächenbeschaffenheit auf der Orthofotokarte (rechts)



Abbildung 8: Vor-Ort-Aufnahme des Beispielgebiet Bahnhofsvorstadt

3.3 Gewerbegebiet Oberlosa

Das Beispielgebiet Oberlosa am südlichen Stadtrand von Plauen (Stadtteil Oberlosa) ist ein teilweise bebautes Industriegebiet entlang der Autobahn A72. Das Beispielgebiet besteht aus drei Teilgebieten, die mit Oberlosa 1, 2a und 2b bezeichnet werden. Die Abgrenzung der einzelnen Teilgebiete ist in den Karten der Abbildung 9 grafisch dargestellt. Der südlichste Teil, Oberlosa 1, ist ein unbebautes Gebiet mit einem festgelegten Bebauungsplan, das sich derzeit vollständig im Besitz der Stadt Plauen befindet und auf welchem die ersten Bauarbeiten stattfinden. Die in Abbildung 10 dargestellte Vor-Ort Aufnahme des Gebietes Oberlosa 1 zeigt Freiflächen im Vordergrund sowie die beginnenden Bauarbeiten im Hintergrund. Der mittlere Teil von Oberlosa (2a) ist ein bereits bestehendes Industriegebiet bei dem sich die meisten Flurstücke in Privatbesitz befinden und das von kommunalen Flächen umgeben ist. Der nördliche Teil der Beispielgebiete (Oberlosa 2b) ist hauptsächlich landwirtschaftliche Fläche, die für die weitere Entwicklung des Industriegebietes vorgesehen ist.



Quellen: BKG, 2023, GeoSN, 2023a

Quellen: BKG, 2023, GeoSN, 2023b

Abbildung 9: Definition der Beispielgebiete Oberlosa 1 (orange), 2a (blau) und 2b (rot) und Oberflächenbeschaffenheit auf der Orthofotokarte (rechts)

In Abbildung 11 werden die Vor-Ort Aufnahmen der beiden Beispielgebiete gegenübergestellt. Dabei wird deutlich, dass Oberlosa 2a Bebauung in Form von Gebäuden und Straßen aufweist während Oberlosa 2b ausschließlich Feld- und Wiesenflächen besitzt.



Abbildung 10: Vor-Ort Aufnahme des Beispielgebietes Oberlosa 1 zeigt große Freiflächen und die beginnenden Bauarbeiten im Hintergrund.



Abbildung 11: Vor-Ort Aufnahme des Beispielgebietes Oberlosa 2a (links) und 2b (rechts)

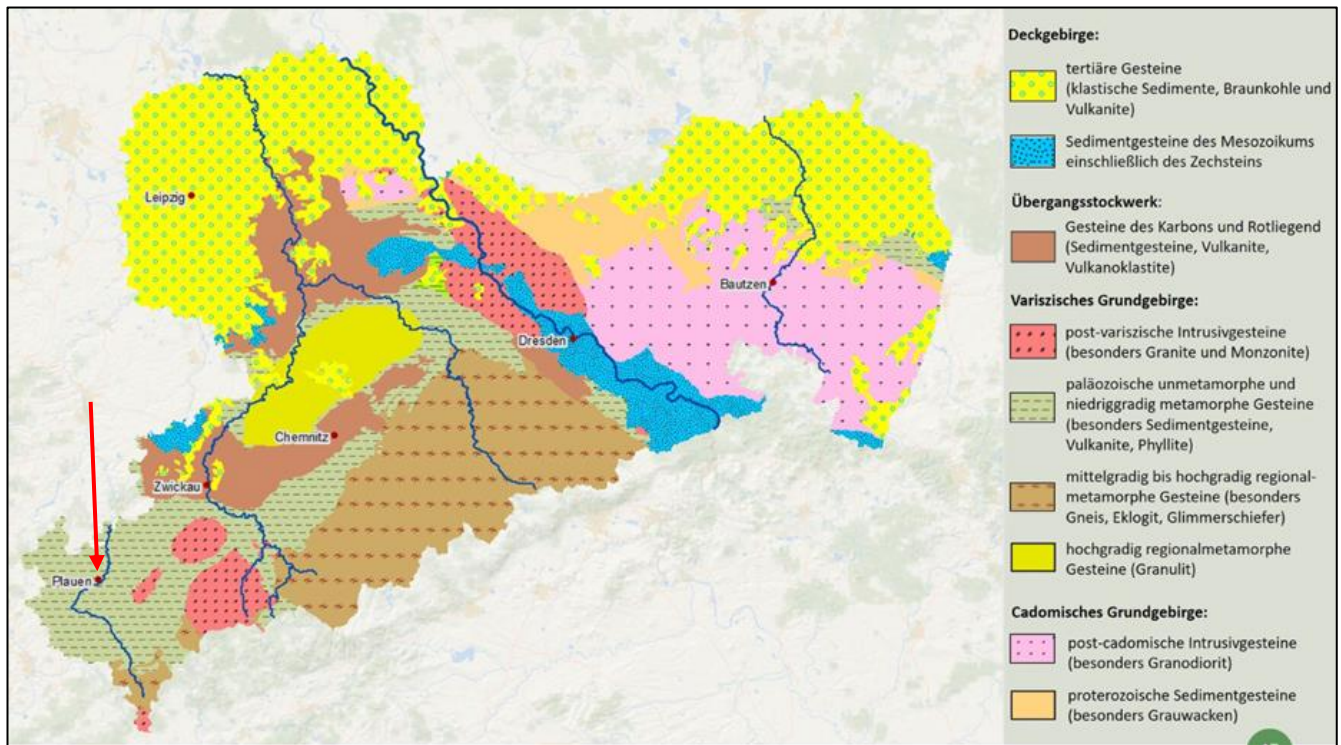
4 Geologische-geothermische Verhältnisse

4.1 Geowissenschaftliche Einordnung des Raums Plauen

4.1.1 Vorgehen zur Bestimmung geologischer Verhältnisse

Einer der grundlegenden Schritte zur Bewertung der Machbarkeit von Erdwärme als regenerative Energiequelle ist die Untersuchung des Untergrundes. Physikalische Eigenschaften der jeweiligen Gesteine wie Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität ermöglichen die Bewertung der energetischen Effizienz. Da die Gesteine im Untergrund im lokalen Raum sehr stark variieren können, ist eine möglichst genaue Einschätzung des Untergrundprofils notwendig. Weiterhin können aus den Fest- und Lockergesteinsabfolgen Schlussfolgerungen zum Grundwassertyp und daraus resultierenden Anforderungen des Bohrprozesses gezogen werden. Die gewählte Vorgehensweise der geologischen Voruntersuchungen soll gleichzeitig eine Orientierung der im Handbuch aufzuführenden Schritte darstellen. Die Untersuchungen werden exemplarisch für die in Kapitel 3 beschriebenen Beispielgebiete in Plauen durchgeführt.

Informationen zur Geologie Sachsens sind auf der Website des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LFULG, 2023) für jeden Anwender frei zugänglich. Der geologische Aufbau (Gesteine, Stockwerke und regionale Einheiten) werden umfangreich beschrieben und geben eine erste Übersicht der zu erwartenden geologischen Situation am jeweiligen Standort. Die geologische Übersichtskarte ist in Abbildung 12 dargestellt. Im südwestlichen Bereich Sachsens stehen die Gesteine des variszischen Grundgebirges an, welche während der variszischen Orogenese vor 380-320 Millionen Jahren (Devon- Unterkarbon) gebildet wurden. In Plauen sind vor allem niedrigmetamorphe Gesteine wie Sedimentgesteine, Vulkanite oder Phyllite zu erwarten (Abbildung 12). In diesem Bereich stehen keine Gesteine des Übergangstockwerks oder des Deckgebirges an.



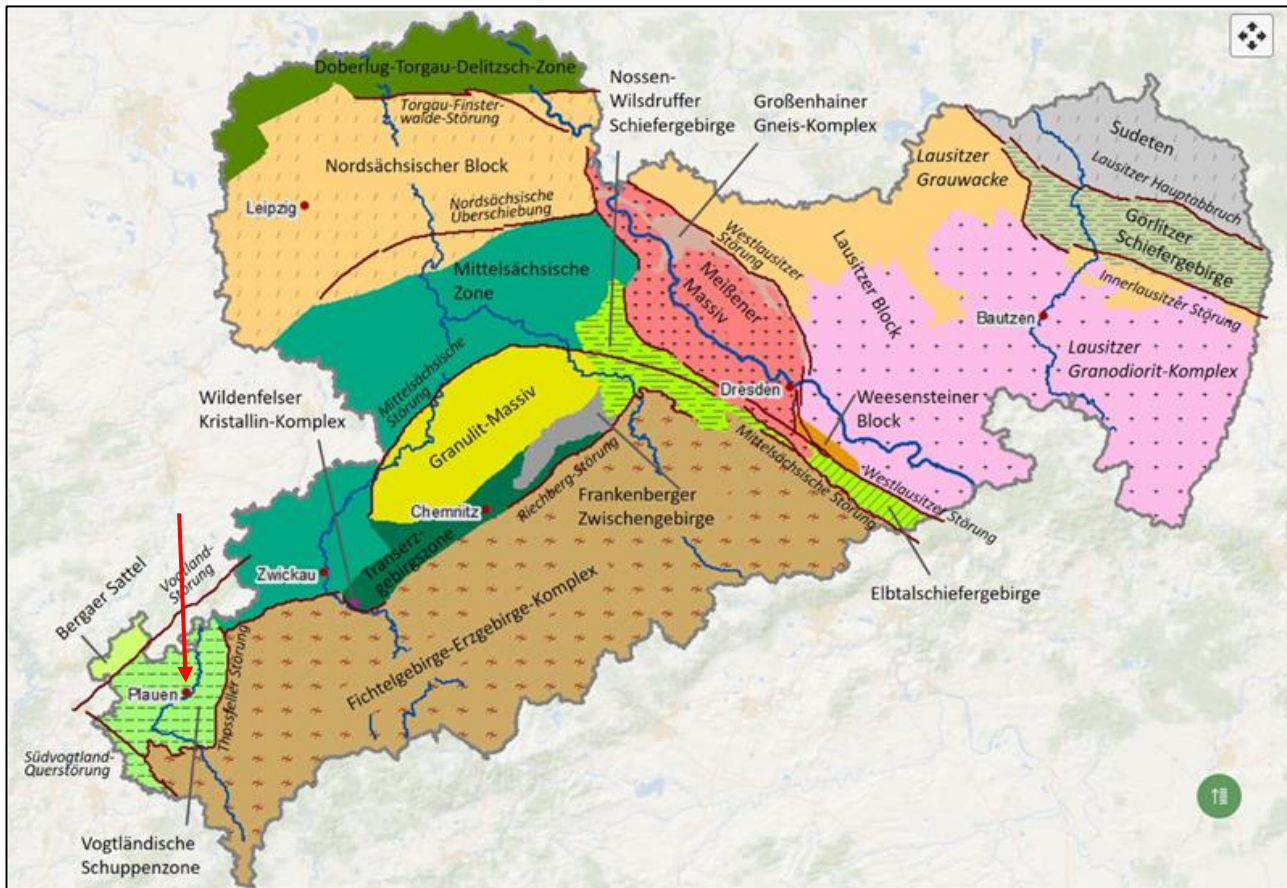
Quelle: LfULG, 2023b

Abbildung 12: Verbreitung wichtiger Gesteine in Sachsen mit Markierung des Untersuchungsgebietes Plauen (LfULG, 2023)

Den Karten der regionalen Einheiten des Grund- und Deckgebirges können charakteristische Informationen der jeweiligen Einheiten entnommen werden (vgl. Abbildung 13). Plauen liegt in der Vogtländischen Schuppenzone, welche sich durch niedriggradig metamorphe Tonschiefer bis Phyllite sowie Sandsteine und Quarzite auszeichnen. Für die Bewertung des Untergrundes sind hierbei allerdings die stark ausgeprägten Störungszonen von Bedeutung, welche abrupte Gesteinswechsel zur Folge haben. Die Schichtfolgen der Untersuchungsgebiete in Plauen können daher lokal sehr stark variieren und sollten im Einzelnen umsichtig betrachtet werden.

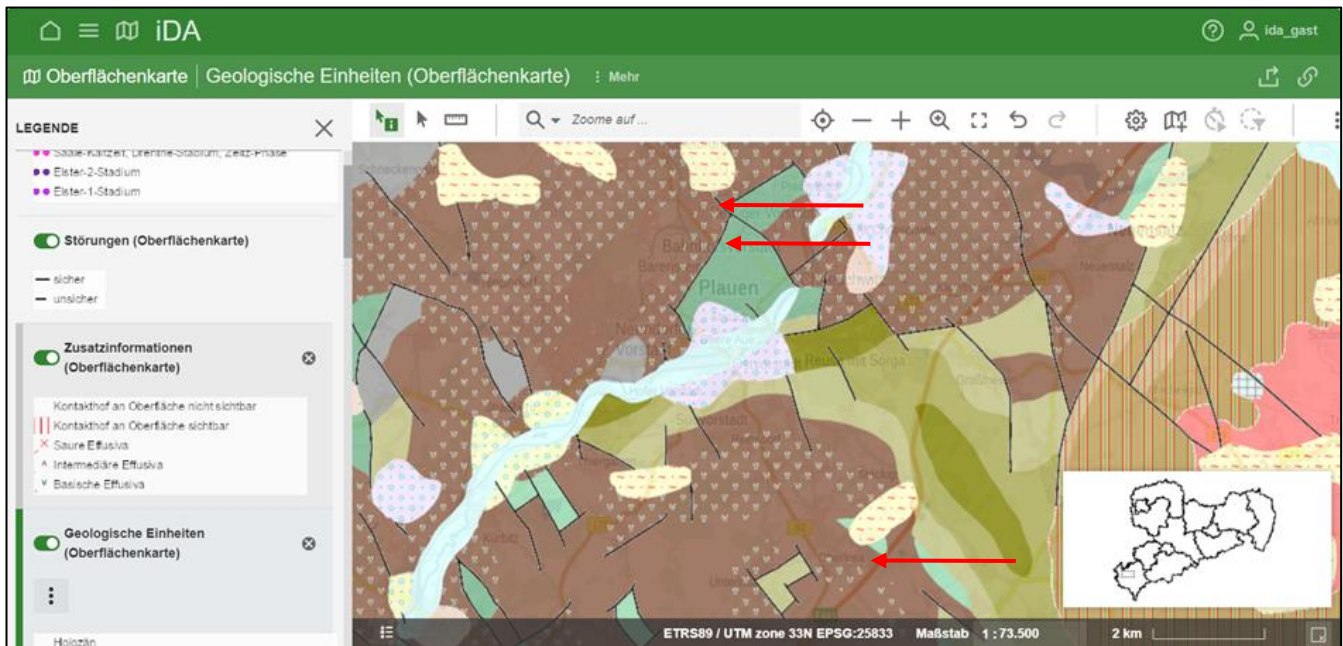
Im nächsten Schritt wurden geologische Karten der Oberfläche genutzt. Eine Auswahl geologischer Karten des Online-Portals iDA oder des Geoportals Sachsenatlas stehen allen Nutzern frei zur Verfügung. Nach der geologischen Karte 1:400.000 des Online-Portals iDA (vgl. Abbildung 14) beispielsweise sind in den Gebieten teilweise metamorph überprägte marine Sediment- und Eruptivgesteine wie Tonschiefer, Kalkstein oder Diabas unterschiedlichen Alters zu erwarten. Im Nordosten Oberlosas stehen geringmächtige Lockergesteine als Hanglehm und Hangschutt an. Detaillierte Karten wie im 1:200.000 Maßstab können z.B. mit QGIS visualisiert werden und bieten eine kleinteiligere Übersicht der Untersuchungsgebiete, weisen aber nur eine bedingte Zugänglichkeit auf. Im Gebiet Rückert Campus und im nordwestlichen Bereich der Bahnhofsvorstadt steht demnach oberflächennah Konglomerat an. Im südöstlichen Bereich der Bahnhofsvorstadt steht Tonschiefer an. Schon in diesem verhältnismäßig kleinen Gebiet zeigt sich damit die Wichtigkeit der lokalen geologischen Bewertungen des Untergrundes. Das

große Gebiet in Oberlosa zeichnet sich durch mehrere Schichten aus, welche oberflächennah angetroffen werden können. Insgesamt können in den Teilgebieten in Oberlosa Tonschiefer, Mikrograbbro sowie Kiesel- und Alaunschiefer und Kalkstein angetroffen werden. Aufgrund dieser kleinteiligen Beschaffenheit der oberflächennahen Gesteine kann eine Variation der tieferliegenden Gesteine über den gesamten Raum der Beispielgebiete vermutet werden.



Quelle: LfULG, 2023b

Abbildung 13: Übersicht der regionalen Einheiten des Grundgebirgsstockwerks mit Markierung des Untersuchungsgebietes Plauen (LfULG; Stand 21.10.2024)



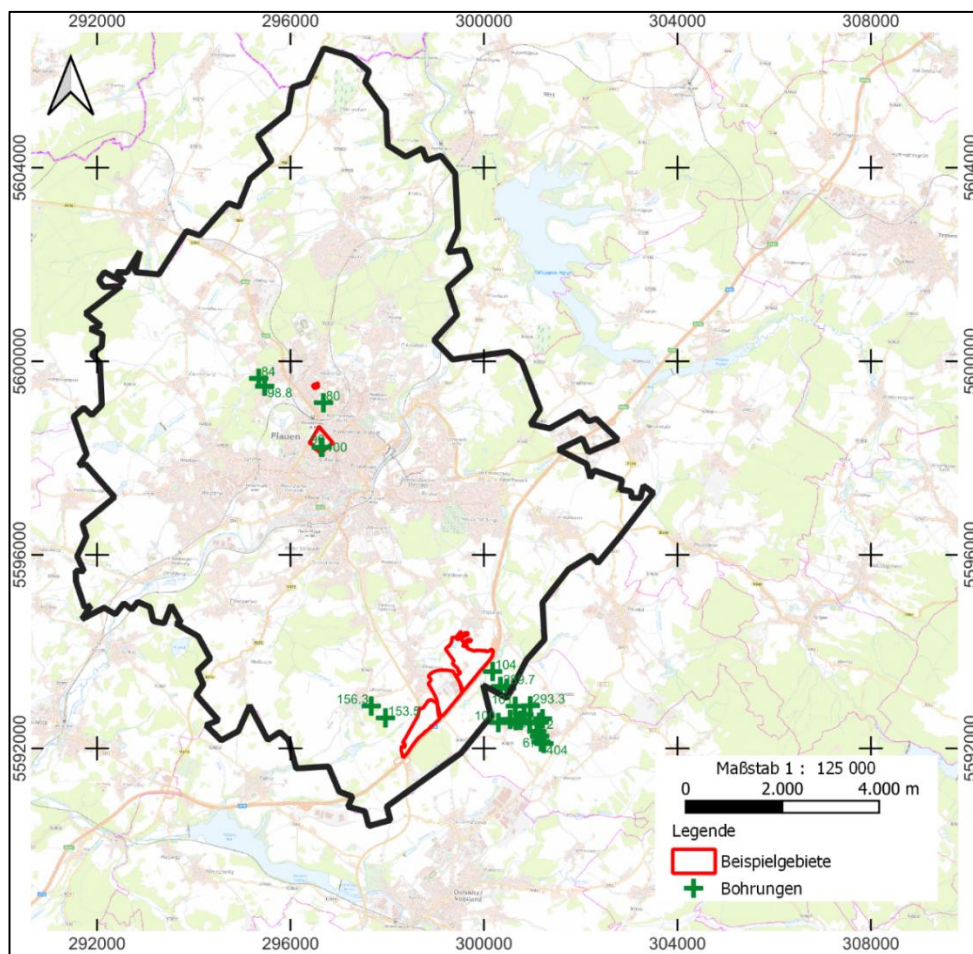
Quelle: SMEKUL, 2024

Abbildung 14: Online-Portal iDA mit der Karte der geologischen Einheiten (Oberflächenkarte) im Gebiet Plauen. Die Pfeile zeigen die Standorte der Beispielgebiete an (SMEKUL, 2024)

Nachdem die geologischen Karten bewertet wurden, erfolgt die Abschätzung des Tiefenprofils anhand umliegender Bohrprofile. Ausgewählte Bohrdaten wurden durch das LfULG abgefragt und übermittelt (Abbildung 15). Auf dieser Grundlage wurden die zu erwartenden Normalprofile an den Standorten abgeschätzt. Da aufgrund der Größe der Gebiete ein einzelnes Normalprofil keine eindeutige Aussage der geologischen Verhältnisse am Standort ermöglicht, stellen diese nur eine ungefähre Abschätzung dar. Die Dichte vorhandener Bohrungen mit ausreichender Tiefe und Nähe zum Standort reicht nicht aus, um mehrere Normalprofile zu erstellen.

Am Standort Rückert Campus stehen vermutlich oberflächennah geringmächtige Aufschüttungen aus Schluff und Kies an. Nach dem Lockergestein können den Bohrprofilen verwitterter Diabas (in Form von Diabaskonglomeraten) und unverwitterter Diabas des Grundgebirges bis 100 m Teufe entnommen werden. Das Profil am Standort Bahnhofsvorstadt zeigt nach einer geringmächtigen Aufschüttung Schiefer bis in 100 m Teufe, welcher eine Kalksteinschicht bei ca. 70 m Teufe aufzeigt. Der Diabas des Grundgebirges wird ab einer Teufe von 150 m vermutet. Aufgrund fehlender Bohrprofile im Umkreis können jedoch keine zuverlässigen Aussagen zum tieferen Untergrund gegeben werden. Im Gebiet Oberlosa steht vor allem im östlichen Bereich Schiefer bis in 100 m Teufe an. Bis zu 200 m Teufe wird Schiefer mit einzelnen Schichten aus Diabas oder Kalkstein unterschiedlicher Mächtigkeit vermutet. In den folgenden Tabellen (Tabelle 1, Tabelle 2 und Tabelle 3) wurden die Schichten der Gebiete dargestellt und die aus der Literatur abgeleiteten Werte für Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Untergrundes bis zu 100 m Teufe aufgezeigt. Demnach zeigen die Literaturwerte eine Wärmeleitfähigkeit von $1,7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

im Gebiet Rückert Campus und 2,1 W/(m·K) am Standort Bahnhofsvorstadt und Oberlosa. Die Wärmekapazität liegt im Bereich von 2,3 - 2,4 J/(m³·K) für alle drei Gebiete.



Quelle: BKG, 2023

Abbildung 15: verwendete Bohrungen

Tabelle 1: Abschätzung geologischer Schichtenabfolge für das Beispielgebiet Rückert Campus und Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit sowie Wärmekapazität des Untergrundes

Standort	Schicht	Tiefe bis [m]	Mächtigkeit [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Wärmekapazität [J/(m ³ ·K)]
Rückert Campus	Aufschüttung	1	1	1	2,2
	Diabas-konglomerat	7	6	2,1	2,2
	Diabas	100	93	1,7	2,4
Gesamtwert		100		1,7	2,4

Tabelle 2: Abschätzung geologischer Schichtenabfolge für das Beispielgebiet Bahnhofsvorstadt und Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit sowie Wärmekapazität des Untergrundes

Standort	Schicht	Tiefe bis [m]	Mächtigkeit [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Wärmekapazität [J/(m ³ ·K)]
Bahnhofsvorstadt	Aufschüttung	0,8	0,8	1	2,2
	Schiefer	70,8	7	2,1	2,3
	Kalkstein	90,8	20	2,4	2,3
	Schiefer	100	9,2	2,1	2,3
Gesamtwert		100		2,1	2,3

Tabelle 3: Abschätzung geologischer Schichtenabfolge für das Beispielgebiet Oberlosa und Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit sowie Wärmekapazität des Untergrundes

Standort	Schicht	Tiefe bis [m]	Mächtigkeit [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Wärmekapazität [J/(m ³ ·K)]
Oberlosa	Schiefer	100	100	2,1	2,3
Gesamtwert		100		2,1	2,3

4.1.2 Bestimmung hydrogeologischer Verhältnisse

Aus hydrogeologischer Sicht besteht die Gesteinsumgebung im Raum Plauen aus Gesteinsschichten, die hauptsächlich kluftdurchlässig und weniger poredurchlässig sind. Es handelt sich hauptsächlich um paläozoische Sedimente und Metasedimente (Ordovizium bis Karbon), die sich mit basaltischen variszischen Magmatiten und Vulkaniten abwechseln. Die paläozoischen Gesteine werden örtlich von nicht sehr stark verfestigten fluvialen und eluviofluvialen Sedimenten des Quartärs (Pleistozän bis Holozän) mit poröser Durchlässigkeit überlagert. Die Durchlässigkeit der Gesteine in diesem Gebiet ist als mittel bis gering eingestuft ($K_f < 10^{-4}$ bis $< 10^{-6}$ m/s). In den Beispielgebieten liegt der Kf-Wert zwischen 10^{-4} bis 10^{-9} m/s. Der Kluft-Poren-Charakter der Umgebung lässt die Bildung eines einzigen Grundwasserleiters nicht zu, die Gesteinsumgebung führt nur zu lokalen Grundwasserleitern mit begrenzter gegenseitiger Verbindung. Der Grundwasserspiegel, die Richtung und die Geschwindigkeit des Grundwasserflusses können lokal sehr variabel sein und lassen sich flächenmäßig nicht einheitlich charakterisieren.

Die Beschaffenheit des hydrogeologischen Umfelds an den Standorten der Beispielquartiere schließt die Nutzung natürlicher Grundwasservorkommen als Quelle geothermischer Energie (Einsatz von Grundwasserwärmepumpensystemen) zur Versorgung von Quartieren grundsätzlich aus. Lediglich die

Nutzung für kleinere Gebäude wie Einfamilienhäuser kann in Betracht gezogen werden, und auch nur dann, wenn die örtlichen Gegebenheiten dies zulassen.

Neben den natürlichen Grundwasserleitern gibt es im Raum Plauen bergbaubedingte Hohlräume im Untergrund. Solche Hohlräume können unter günstigen Umständen auch für offene und geschlossene geothermische Anlagen eine interessante Grundwasserquelle darstellen (siehe Kapitel 3.4.7). Wenn ein Grubengebäude Grundwasser in nennenswerten Mengen ableitet und fördert oder eine bedeutende Grundwasserreserve enthält, kann seine Nutzung in Betracht gezogen werden. Die Bewertung muss jedoch umfassend sein und Faktoren wie die Chemie des Grubenwassers und Vorhersagen über seine Entwicklung einbeziehen. Derartige Informationen sind für das Prospektionsgebiet derzeit nicht verfügbar. Angesichts der Ausdehnung der unterirdischen Hohlräume und ihrer Lage im hydrogeologischen Massiv erscheint die Möglichkeit ihrer Nutzung derzeit eher gering.

Nach derzeitigem Kenntnisstand ist das Vorhandensein tieferer hydrothermalen Aquifere unwahrscheinlich, so dass die nähere Umgebung in Bezug auf das hydrothermale Potenzial als wenig aussichtsreich angesehen werden kann (AGEMAR et. al, 2018).

Aus den geschilderten Sachverhalten kann gefolgert werden, dass die direkte Nutzung von Grundwasser als Wärmequelle (offene Systeme) im Raum Plauen sehr begrenzt ist; unter günstigen Bedingungen können nur einzelne kleine Objekte versorgt werden. Bei anderen Wärmequellen (z.B. Erdwärmesonden, Energiepfähle) kann das Grundwasser eine lokal bedeutsame Wirkung entfalten, wobei das Auftreten einer lokal bedeutsamen Strömung, z.B. durch eine Störungszone, die Effizienz des Wärmeaustausches zwischen dem Erdreich und dem genutzten System deutlich erhöhen kann. Gleichzeitig stellt sie aber auch eine Quelle der Unsicherheit dar, die die Interpretation der gemessenen Feldwerte, insbesondere der Wärmeleitfähigkeit, erheblich erschweren kann. Das Vorkommen von Grundwasser und die Art seiner Strömung am Standort müssen daher während der Feldarbeiten sorgfältig überwacht werden.

4.1.3 Thermische Verhältnisse - Zusammenfassung und Analyse des vorhandenen Wissens

Die Gesteinsumgebung in und um die Stadt Plauen war in der Vergangenheit Gegenstand einer Reihe von lokalen und regionalen Geothermieprojekten. In Forschungsprojekten von regionaler und überregionaler Bedeutung wurden die Potenziale verschiedener geothermischer Wärmequellen sowie die thermischen Eigenschaften und Temperaturverhältnisse der Gesteinsumgebung beschrieben. Tabelle 4 und Tabelle 5 fassen die Forschungsprojekte und die Daten zusammen, die diese Projekte für die Analyse der thermischen Eigenschaften und Temperaturverhältnisse der Gesteinsumgebung verwendet haben.

Tabelle 4: Ergebnisse von Forschungsprojekten, die die Grundlage für die Analyse der thermischen Eigenschaften und Temperaturbedingungen der Gesteinsumgebung des Untersuchungsgebiets bilden

Projektname	Daten	Organisation	Quelle
GeoPLASMA-CE	WLF, Oberflächentemperatur, Interessenkonflikte, Potenzialbewertung	GeoPLASMA-CE Partner	GeoPLASMA-CE Portal
GeotIS	Potenzialbewertung, 3D-Temperaturmodell	LIAG	GeotIS Portal
Geothermieatlas Sachsen	Entzugsleistung der einzelnen Erdwärmesonden	LfULG	Portal sachsen.de

Tabelle 5: Zusammenfassung der Datengrundlage für die Analyse der thermischen Eigenschaften und Temperaturbedingungen der Gesteinsumgebung

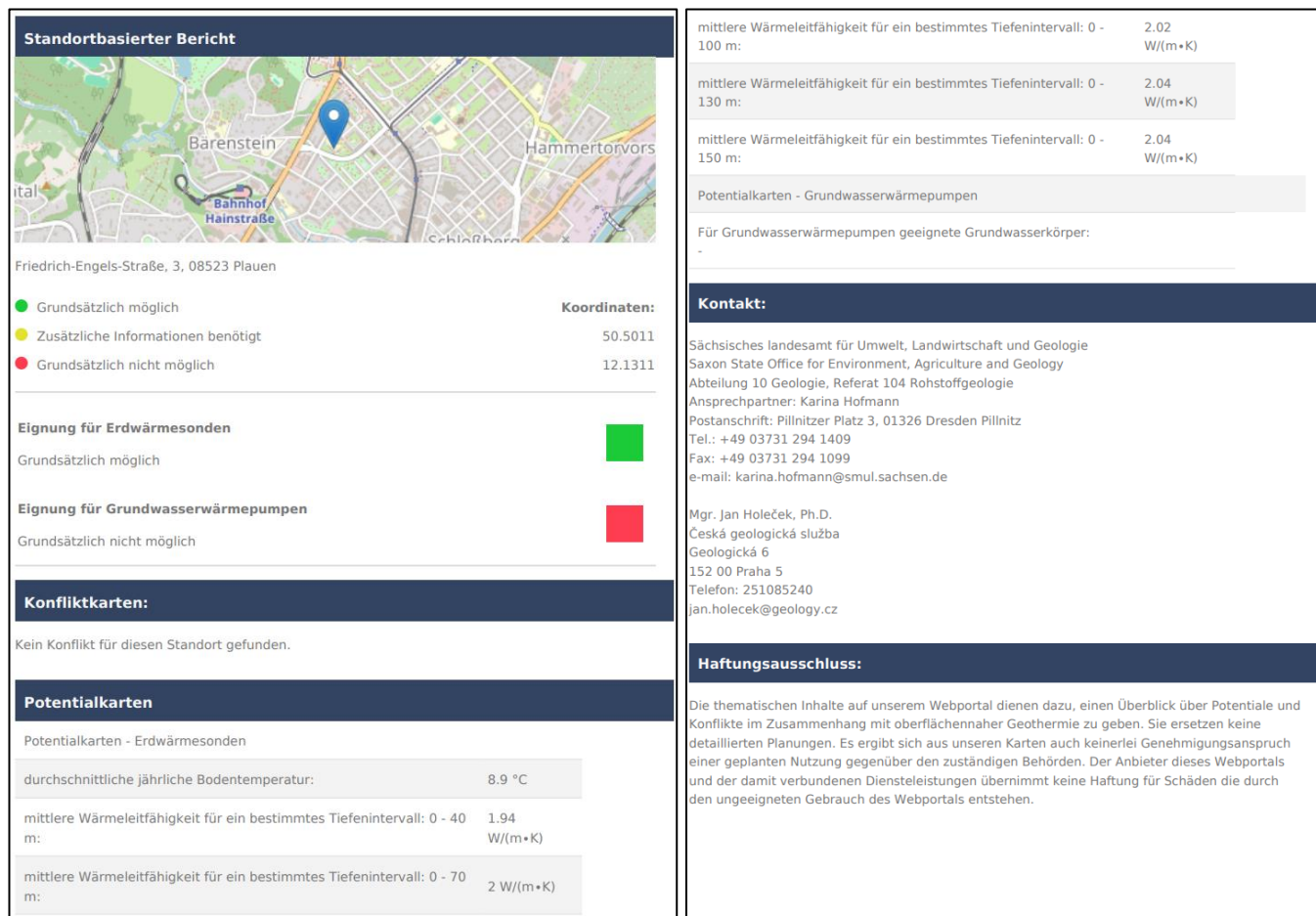
Projekt Nr.	Daten	Organisation	Quelle
1	TRT Daten*	GEK**	Firmenarchiv
2	TRT Daten*, T-log	GEK**	Firmenarchiv
3	TRT Daten*, T-log	GEK**	Firmenarchiv
4	TRT Daten*, T-log	GEK**	Firmenarchiv
5	TRT Daten*, T-log	GEK**	Firmenarchiv
6	TRT Daten*	GEK**	Firmenarchiv
7	TRT Daten*	-	LfULG
8	TRT Daten*	-	LfULG
9	TRT Daten*	-	LfULG

* TRT-Daten beinhalten den ermittelten Wert der effektiven Wärmeleitfähigkeit und die mittlere unbeeinflusste Untergrundtemperatur zum Zeitpunkt der Messung

** geoENERGIE Konzept GmbH

Im EU-Projekt GeoPLASMA-CE wurde das Potenzial der oberflächennahen geothermischen Ressourcen im Pilotgebiet Vogtland/W-Böhmen, das auch die Stadt Plauen und ihre Umgebung umfasst, detailliert beschrieben. Das Informationssystem des Projektes ermöglicht neben der aktuellen Bewertung des Potenzials von offenen Systemen (Grundwasserwärmenutzung), Grundwasserleitern und Erdwärmesonden in Form von Ampelkarten auch die überschlägige Ableitung von Stichkennwerten zur Bewertung des geotechnischen Potenzials, insbesondere von Erdwärmesonden. Dazu gehören:

- die mittlere Wärmeleitfähigkeit der Gesteinsumgebung für verschiedene Tiefenstufen,
- die mittlere Oberflächentemperatur und
- die Bewertung des Interessenkonflikts.



Quelle: GEOPLASMA-CE, 2023

Abbildung 16: Standortbasierter Bericht zur Machbarkeit von geothermischen Systemen für das Beispielgebiet Bahnhofsvorstadt

Die Wärmeleitfähigkeit der Standorte aus GeoPLASMA-CE wurde den Literaturwerten für eine 100 m tiefe Bohrung gegenübergestellt (vgl. Tabelle 6). Die Literaturwerte des Rückert Campus sind niedriger als die im Portal angegebenen. Weiterhin liegt die Wärmeleitfähigkeit der Bahnhofsvorstadt oberhalb der im Portal ausgegebenen Werte. Die Wärmeleitfähigkeit für Oberlosa liegt im unteren Bereich der im Portal gegebenen Wärmeleitfähigkeit.

Tabelle 6: Vergleich der Gesteinswärmeleitfähigkeit der Beispielgebiete aus Literaturwerten und GeoPLASMA-CE.

Standort	Tiefe [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/m•K]	
		Literatur	GeoPLASMA-CE
Rückert Campus	100	1,7	1,93 – 1,96
Bahnhofsvorstadt	100	2,1	1,95 – 2,04
Oberlosa	100	2,1	2,10 – 2,67

Das vom LIAG betriebene Geothermische Informationssystem (GeotIS) hat zum Ziel, aktuelle Forschungsdaten zu Potenzial und Nutzung geothermischer Energie in Deutschland bereitzustellen. Das Informationssystem umfasst auch die Abschätzung des Potenzials tiefer geothermischer Ressourcen in

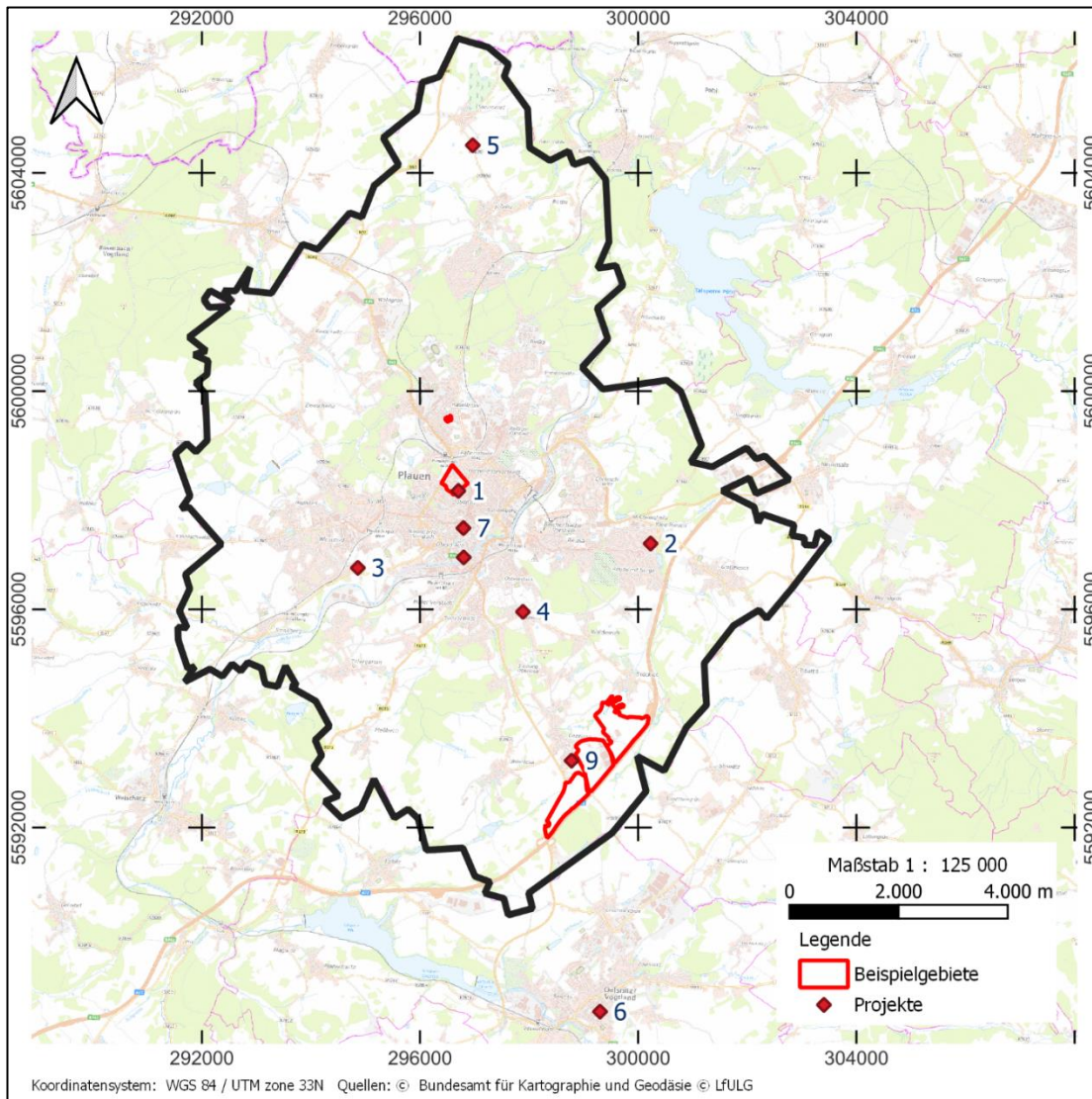
der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen des „Geothermieatlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie“ (SCHULZ et. al, 2013) und der "Hydrothermischen Ressourcen für verschiedene Temperaturniveaus" (AGEMAR et. al, 2018). Aus diesen Quellen wird ersichtlich, dass im Stadtgebiet Plauen kein bekanntes oder zu erwartendes hydrothermales oder Potenzial identifiziert wurde.

Tabelle 7: Zusammenfassende Tabelle der Ergebnisse der Thermal Response Tests und der Temperaturprofilmessungen im Raum Plauen und im Umkreis von 5 km

Nr.	Projektbezeichnung	WLF [W/(m·K)]	T [°C] TRT	T [°C] T-Log	Tiefe [m]
1	Bahnhofsvorstadt	2,05	11,45	-	100
2	Kleinfriesen	3,5	10,7	10,5	69
3	Glockenberg	4,2	10,9	11,4	130
4	Reinsdorf	1,9	11,1	10,55	134
5	Steinsdorf	1,8	11,1	9,8	69
6	Oelsnitz	2,87	10,62	-	80
7	Altstadt	2,91	12,2	-	110
8	Obere Aue	-	-	-	140
9	Oberlosa	2,83	9,59	-	100

Zur Beurteilung der Temperaturverteilung kann das vom LIAG im Jahr 2022 erstellte 3D-Temperaturmodell der Gesteinsumgebung herangezogen werden, das eine allgemeine Vorstellung von der Temperaturverteilung in den oberen Bereichen der Lithosphäre in Deutschland vermittelt. Die oberen Schichten des Temperaturmodells ermöglichen zusammen mit der mittleren Oberflächentemperatur eine näherungsweise Bestimmung des geothermischen Gradienten auch auf der Ebene des Untersuchungsgebietes.

Um ein detaillierteres Bild zu erhalten, werden zudem die Ergebnisse von bereits umgesetzten Projekten im Untersuchungsgebiet Plauen aus der Datenbank des LfULG hinzugezogen. Insbesondere Daten aus Temperaturprofilmessungen und Thermal Response Tests werden dabei untersucht. Einige der Messungen wurden durch die geoENERGIE Konzept GmbH durchgeführt. Die Tabelle 7 fasst die in der Stadt Plauen und im Umkreis von 5 km um die Stadt durchgeführten Messungen zusammen. Abbildung 17 zeigt die Lage der durchgeführten Messungen und der Beispielgebiete.



Quellen: BKG, 2023, LfULG

Abbildung 17: Lokalisierung der Thermal Response Tests und der Temperaturprofile in der Umgebung von Plauen und im Umkreis von 5 km

Die durchgeführten Thermal Response Tests ergaben eine relativ große Bandbreite von Wärmeleitfähigkeitswerten von 1,8 bis 4,2 W/(m·K). Aus den Kurven der stationären Temperaturmessungen in den Erdwärmesonden vor den Thermal Response Tests lässt sich schließen, dass ein Teil der Messungen offenbar durch den Grundwasserfluss in lokalen Kluftsystemen beeinflusst wurde (Abbildung 18).

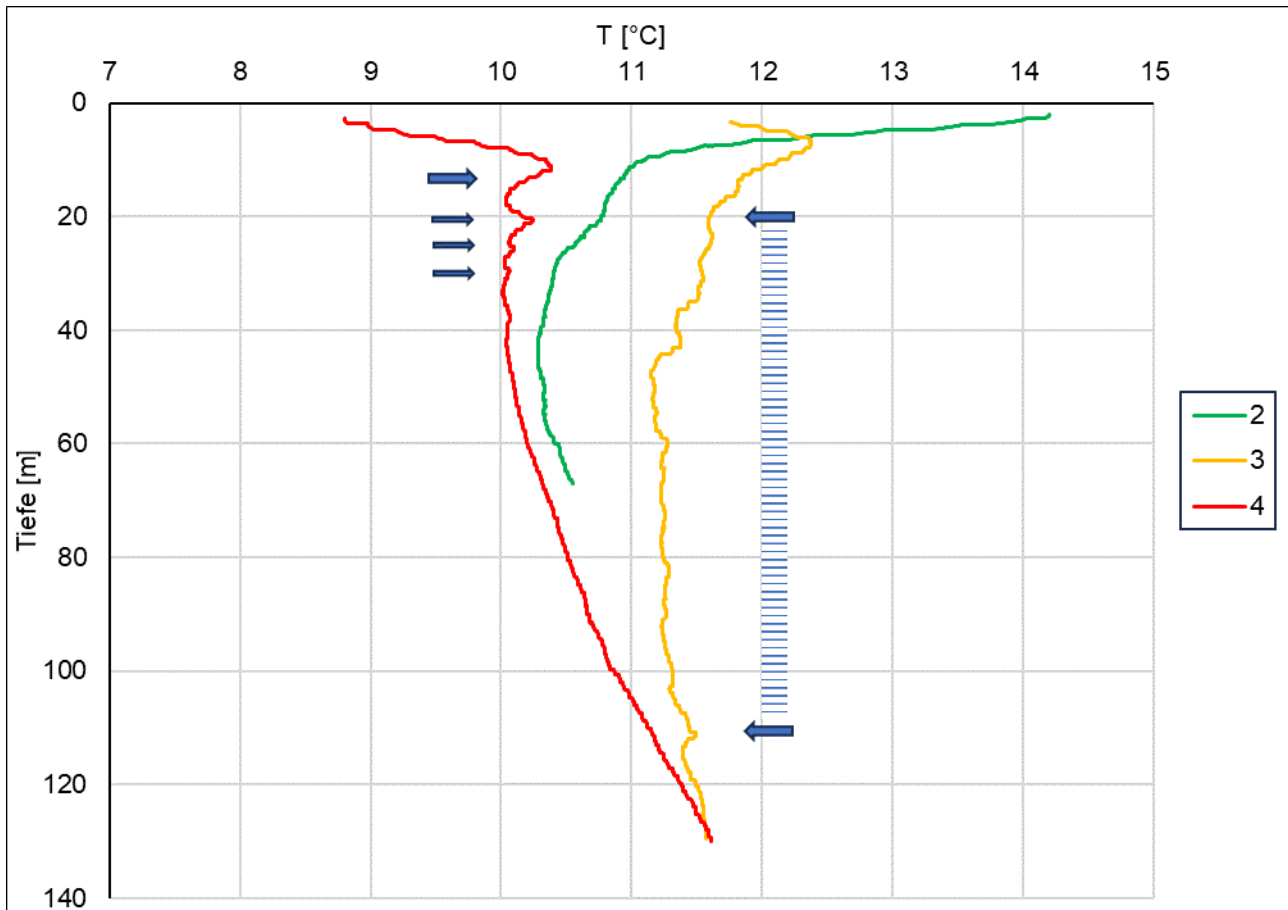


Abbildung 18: Beispiel für Temperaturprofilmessungen (T-Log), die den Einfluss des Grundwasserflusses (blaue Pfeile) zeigen

In Anbetracht der geologischen Situation, der Streuung der Messdaten und der Ausdehnung der Messungen wird deutlich, dass mit Ausnahme des Beispielgebietes Bahnhofsvorstadt die Messwerte nicht direkt für die Bewertung der Beispielgebiete herangezogen werden können. Für Erdwärmesonden bis zu einer Tiefe von 150 m kann das oben erwähnte geothermische Modell des Gebietes verwendet werden, um die Wärmeleitfähigkeit der Gesteine für die Zwecke der Machbarkeitsstudie näherungsweise zu bestimmen. Dieses Modell (GeoPLASMA-CE) steht zurzeit nur für ein begrenztes Gebiet im Südwesten Sachsens zur Verfügung. Eine weitere Möglichkeit zur Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes für verschiedene Tiefenstufen bietet der „Geothermieatlas Sachsen“ (LFULG, 2020), welcher Daten für Sachsen zur Verfügung stellt.

Um die mittlere Wärmeleitfähigkeit tieferer Erdwärmesonden (bis zu einer Tiefe von 500 m) zu ermitteln, muss ein statisches geothermisches Modell für das betreffende Gebiet auf der Grundlage eines geologischen 3D-Modells und der mittleren Wärmeleitfähigkeiten der dargestellten geologischen Einheiten erstellt werden.

Temperaturprofilmessungen (T-Log) bis in 400 m Tiefe liegen für keines der Beispielgebiete vor. Aus den in und um Plauen gemessenen Daten kann die Temperaturentwicklung mit der Tiefe aufgrund der

recht begrenzten Datenmenge nur näherungsweise ermittelt werden. Abbildung 19, in der die Messungen für den Bereich innerhalb von 15 km um Plauen zusammengefasst sind, zeigt eine mehr oder weniger ähnliche Temperaturentwicklung der Gesteinsumgebung mit zunehmender Tiefe. Die gemessenen Temperaturkurven stimmen mit der theoretischen Temperaturentwicklung für das Plauener Gebiet gemäß dem LIAG-Modell überein. Das modellierte Temperaturprofil entspricht der Südspitze des Beispielgebietes Bahnhofsvorstadt. Der LIAG-Modellschnitt zeigt einen Temperaturanstieg in beiden Tiefenstufen von Nordwest nach Südost. Im Raum Plauen ist eine Veränderung von 2,5 bis 3 K mit dem Beginn eines ähnlichen geothermischen Gradienten zu erkennen. Unter Berücksichtigung der regionalen Temperaturverschiebung sowie des wahrscheinlichen Einflusses von Kluftgrundwasserleitern, die in einigen Messungen zu beobachten sind, scheinen die gemessenen Kurven mit der modellierten Temperaturentwicklung übereinzustimmen.

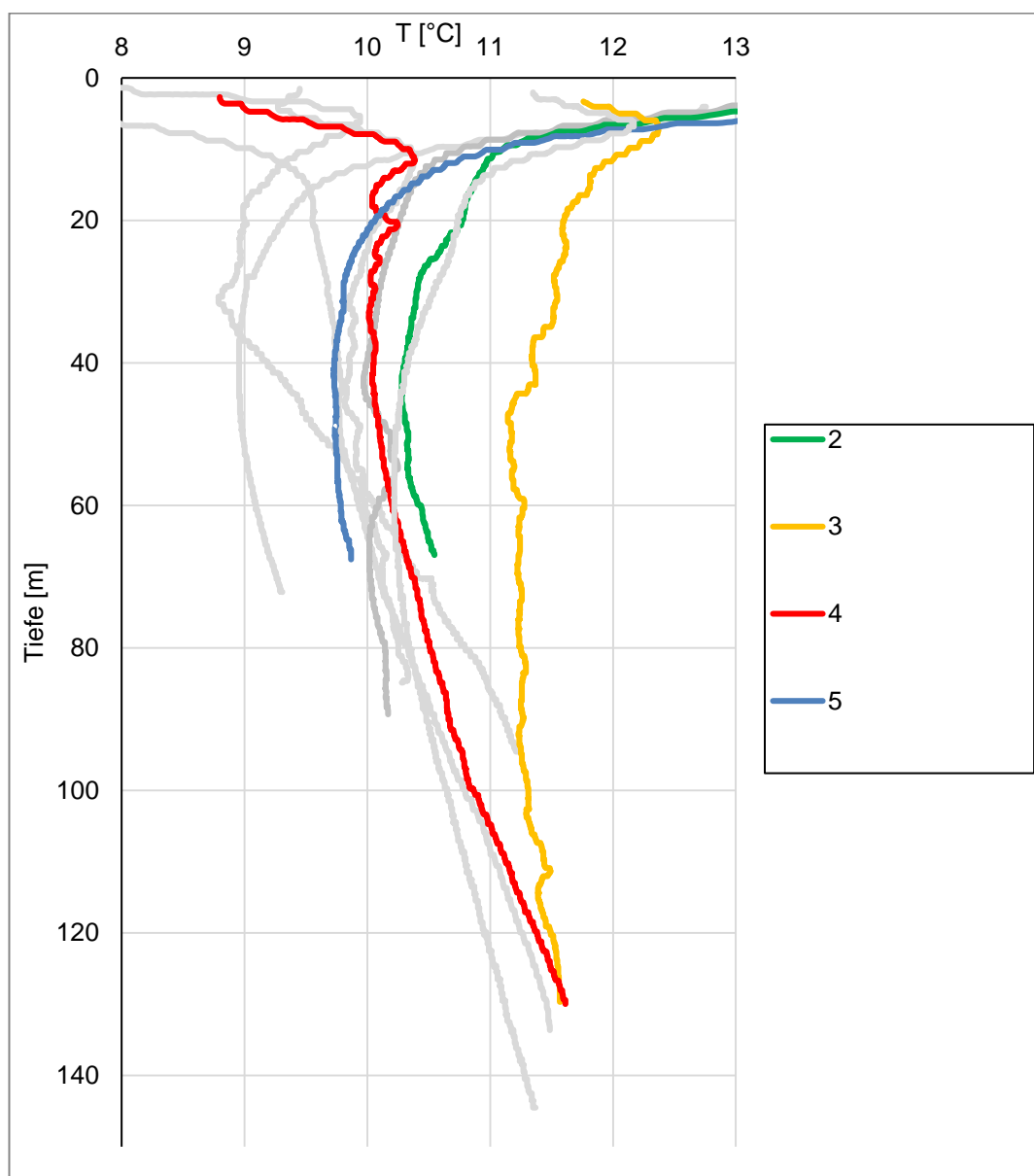
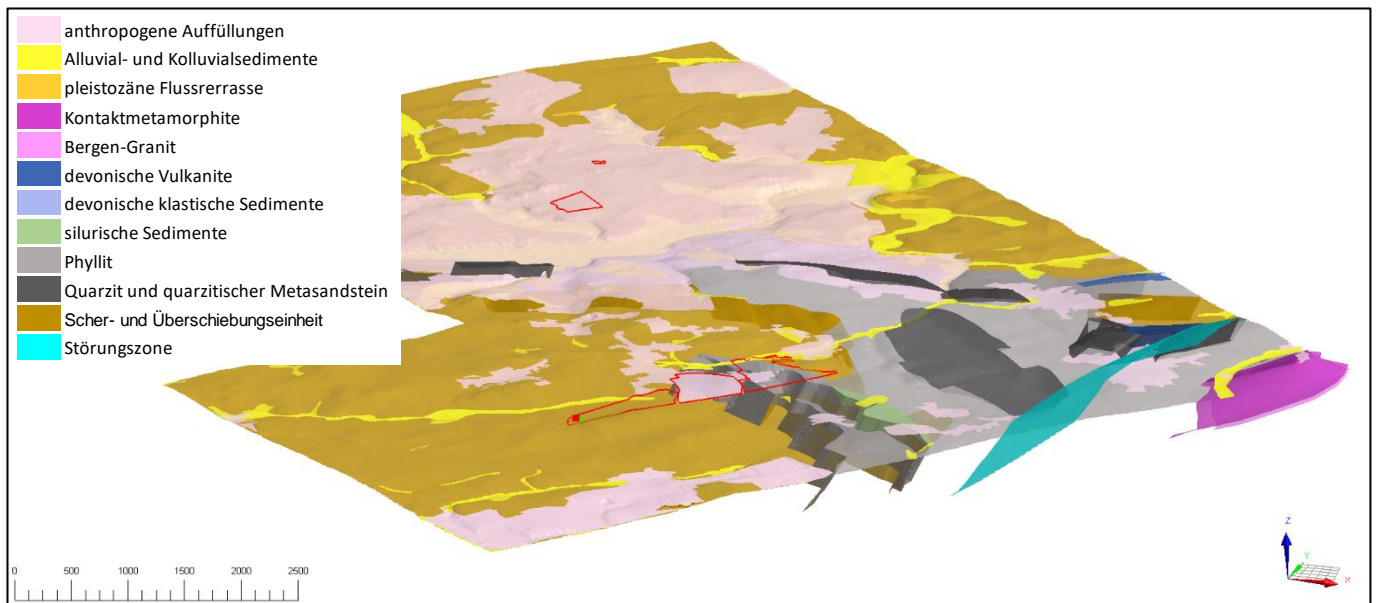


Abbildung 19: Darstellung mehrerer Temperaturprofilmessungen (T-Log)

4.2 Geologisches und geothermisches Modell

4.2.1 Geologisches Modell-GeoPLASMA-CE



Quelle: GEOPLASMA-CE, 2019

Abbildung 20: Geologisches 3D-Modell der Beispielgebiete

Ein geologisches Modell des Untergrundes für ausgewählte Gebiete in Sachsen wurde im Forschungsprojekt GeoPLASMA-CE erstellt (Abbildung 20). Die dabei ermittelten Daten können für die Bestimmung der Untergrundparameter für die Quartierstudie in Plauen genutzt werden. Das Modell enthält insgesamt 17 generalisierte geologische Einheiten deren Beschreibung sowie Wärmeleitfähigkeitswerte in zusammengefasster tabellarischer Form dem Anhang entnommen werden können (Tabelle A 1). Die im Modell Plauen vorkommenden Einheiten werden im folgenden Kapitel beschrieben.

4.2.2 Erstellen eines geothermischen Modells

4.2.2.1 Gesteinswärmeleitfähigkeit

Das geothermische Modell der Beispielgebiete, welches eine 3D-Verteilung der Wärmeleitfähigkeiten (WLF) und Temperaturen enthält, basiert auf dem geologischen 3D-Modell GeoPLASMA-CE des LfULG. Das geologische Modell wird auch durch die Bohrlochdokumentationen von Bohrungen in der Umgebung der Beispielgebiete verifiziert. Das geologische Modell zeigt einen Ausschnitt aus dem regionalen geologischen Modell des Erzgebirgs-Vogtlandkreises. Die in dem Ausschnitt enthaltenen Modellschichten sind in der Tabelle 8 zusammengefasst. Nur 6 Modellschichten erstrecken sich in die Beispielgebiete, von denen nur die zwei Einheiten Phyllit und Schuppenzone (Einheiten 26 und 34) die geologische Grundstruktur der Beispielgebiete bilden und die anderen verschiedene Formen von unverfestigten Deckschichten mit geringer Bedeutung darstellen.

Tabelle 8: Wärmeleitfähigkeiten der Schichten aus dem Projekt GeoPLASMA-CE

Nr	Name Schicht	Gesteinseinheit	WLF trocken	WLF gesättigt	HGE
1	anthropogenic fillings	Anthropogene Auffüllungen: Bergbauhalden, Abraum, Müll, Gesteinsmassen, Holozän	0,4	1,6	11100
3	alluvial fine-clastic sediments	Bindige holozäne Talfüllungen: Auenlehm: alluvialer Ton, Schluff, Sand, Holozän	0,5	1,7	11320
4	alluvial coarse-clastic sediments	Alluvialer Kies: Holozän// Auenkiese	0,4	1,8	11360
5	colluvial sediments	Gehängelehm: kolluvialer Lehm und Solifluktionssedimente	0,5	1,7	12210
26	phyllite	Gruppe der Phyllite: Tonschiefer, Phyllit, untergeordnet Chloritschiefer	2,1	2,9	83330
34	wrench and thrust unit	Schuppenzone: stark gestörte Melange paläozoischer Gesteine (Cadomische Magmatite, Metagranit bis Orthogneis)	1,9	2,1	24

Die geothermischen Modelle wurden für alle Beispielgebiete in ihrer gesamten Ausdehnung erstellt. Die maximale Tiefe des Modellgebiets wurde auf 400 m festgelegt, weshalb das geologische Modell um eine Tiefe von etwa 80 – 100 m erweitert werden musste. Die Erweiterung des geologischen Modells wurde in diesem Stadium nur für die Umgebung der Beispielgebiete durch vektorielle lineare Extrapolation der Grenzflächen der entsprechenden geologischen Körper durchgeführt.

Die Mächtigkeit der Deckschichten liegt in der Größenordnung von wenigen Metern. Die Geringmächtigkeit der Deckschichten führt zu einem marginalen Einfluss der thermischen Eigenschaften (insbesondere die effektive Wärmeleitfähigkeit) auf das Gesamtprofil. Die einzigen Ausnahmen könnten wasserführende Teile der Deckschicht sein, z. B. alluviale Sedimente in der Nähe von permanenten Wasserläufen oder lokalen Quellschalen. Die Wahrscheinlichkeit einer signifikanten Grundwasserneubildung innerhalb der Schwemmgebiete beschränkt sich im Wesentlichen auf die Bahnhofsvorstadt und den nördlichen Teil von Oberlosa 2b, wo aufgrund des Auftretens von tektonischen Störungen eine Anreicherung des Schwemmgrundwasserleiters durch geklüftetes Grundwasser angenommen werden kann. Die Ergebnisse der Rammkernsondierungen und der TRTs im Beispielgebiet Bahnhofsvorstadt deuten zwar nicht auf ein solches Szenario hin, können aber nach heutigem Kenntnisstand nicht völlig ausgeschlossen werden.

Die Einheiten des geologischen Grundgerüsts bestehen aus der Gruppe der Phyllite (Einheit 26) und der Schuppenzone (Einheit Nr. 34). Diese bilden den größten Teil des Modellgebietes und haben durch

ihre gegenseitige Überlagerung einen dominanten Einfluss auf die thermischen Eigenschaften der Gesteinsumgebung. Bei der Erstellung und der anschließenden Interpretation des geothermischen Modells ist jedoch zu berücksichtigen, dass für dessen Erstellung ein gewisses Maß an Verallgemeinerung notwendig war. Dies gilt insbesondere für die Schuppenzone, die, wie ihr Name schon sagt, mehrere Gesteinsarten umfasst, die später metamorphosiert und an ihre heutige Position innerhalb der variszischen Formation verschoben wurden. Bei der Neuinterpretation der geologischen Daten mit Hilfe eines geologischen Modells ist daher zu prüfen, inwieweit dieses Modell der tatsächlichen Situation der einzelnen Beispielgebiete entspricht. Verfügbare geologische und hydrogeologische Karten, Beschreibungen von Bohrprofilen und Ergebnisse von TRTs, die in und um die Beispielgebiete durchgeführt wurden, wurden verwendet, um den Grad der Übereinstimmung des Modells mit der Situation zu beurteilen. Die für das geothermische Modell verwendeten Wärmeleitfähigkeitswerte der Schuppenzone wurden dann für die einzelnen Beispielgebiete nach Rücksprache mit dem LfULG auf die entsprechenden gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeitswerte abgestimmt. Für die anderen Modelleinheiten wurden die vom LfULG empfohlenen Wärmeleitfähigkeitswerte für alle Beispielflächen verwendet.

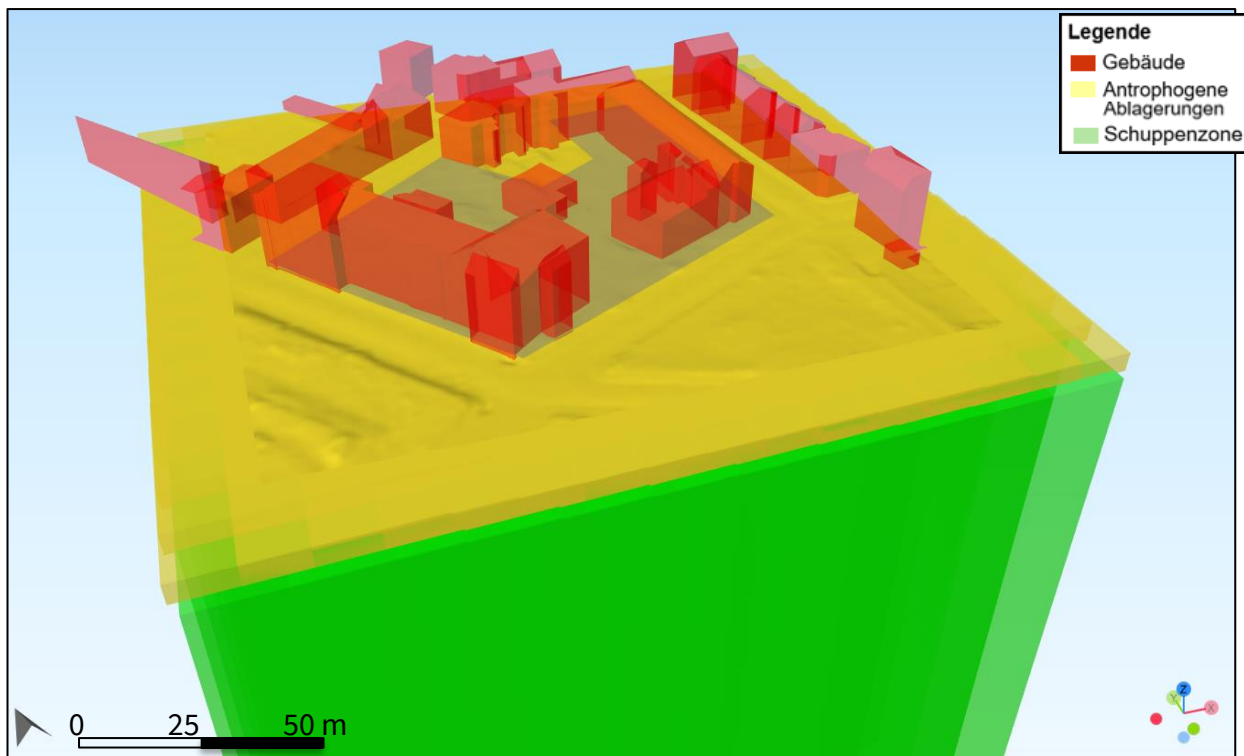
Auch das Vorkommen von Grundwasser in den Grundeinheiten des geologischen Aufbaus, das zwar an einigen gemessenen Temperaturprofilen im Gebiet zu beobachten ist, wurde aufgrund der Klüftigkeit des Grundwasserleiters und der generell geringen hydraulischen Leitfähigkeit der Gesteinsumgebung nicht im Detail berücksichtigt. Der Einfluss des Grundwassers auf die thermischen Eigenschaften der Gesteinsumgebung wurde daher nur pauschal über die entsprechenden Wärmeleitfähigkeitswerte in das Modell eingeführt.

Die räumlichen Verteilungen von Wärmeleitfähigkeit und Temperaturen wurden zur weiteren Verwendung und Visualisierung in effektive Werte umgewandelt. Das Modell der effektiven Wärmeleitfähigkeit stellt den Mittelwert dieser Größe bis zur gewählten Tiefe dar und ist eine Analogie der TRT-Ergebnisse. Die Modelle der effektiven Wärmeleitfähigkeit wurden als kontinuierliche Funktionen von diskreten Größen mit einer horizontalen Auflösung von 10 x 10 m verarbeitet. Das Modell der mittleren Gesteinstemperatur zeigt die durchschnittliche Temperatur des angegebenen Tiefenintervalls. Zur visuellen Darstellung des geothermischen Modells wurde die Verteilung der effektiven Wärmeleitfähigkeit innerhalb der einzelnen Beispielgebiete in Tiefenschichten von 100 bis 400 m mit einer Schrittweite von 50 m aufgetragen.

4.2.2.2 Campus Rückertschule

Nach dem geologischen Modell des LfULG weist das Beispielgebiet Rückert Campus eine relativ einfache geologische Situation auf (Abbildung 21). Die dominierende Gesteinseinheit, bei der es sich über-

wiegend um metamorphosierte Magmatite handelt, wird nur von einer 3 – 5 m mächtigen Schicht anthropogener Sedimente überdeckt. Eine ähnliche Situation ist in der näheren Umgebung des Beispielgebiets zu beobachten.



Quelle: GEOPLASMA-CE,2019

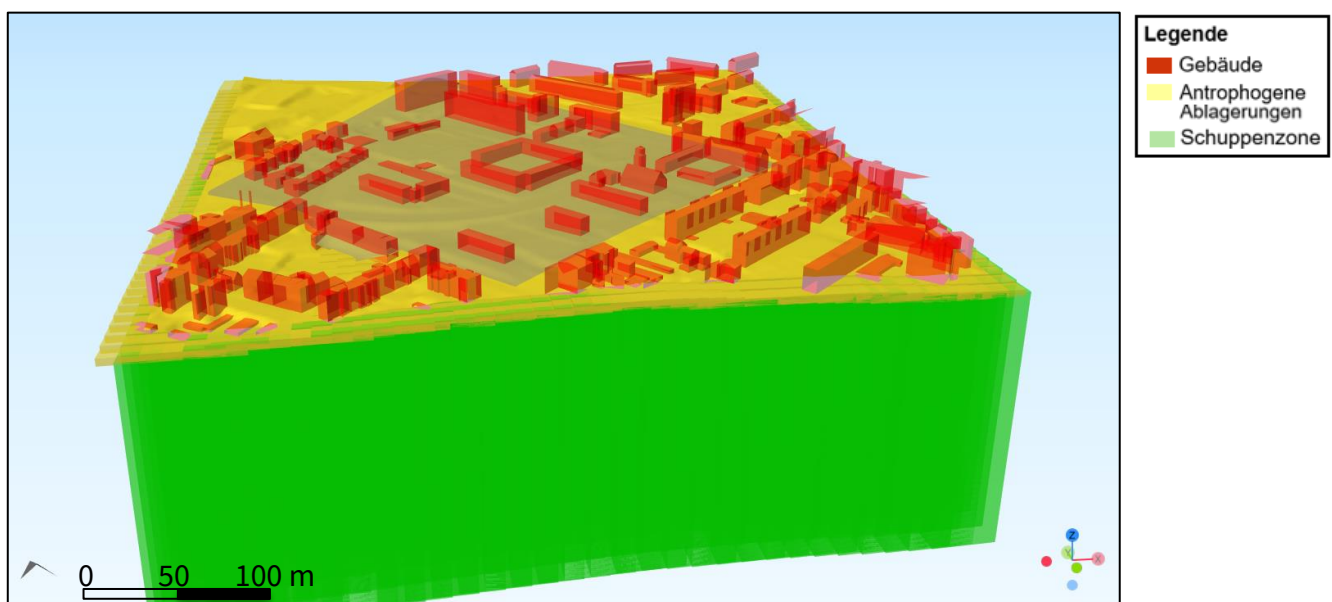
Abbildung 21: Geologisches 3D-Modell des Beispielgebiets Rückert Campus (nach GeoPLASMA-CE und LOD2)

Die Vorrangstellung des geologischen Modells in Verbindung mit dem begrenzten Gebiet impliziert die Einheitlichkeit des geothermischen Modells, die nur durch das Vorhandensein von Aquifertektonik gestört werden kann, welche in dem Modell nicht erfasst ist. Die Verwerfungen in der unmittelbaren Umgebung des Beispielgebiets Rückert Campus sind derzeit weder in geologischen noch in hydrogeologischen Karten erfasst. Der Einfluss des Grundwasserflusses auf das Wärme- und Temperaturregime der Gesteinsumgebung wurde daher bei der Erstellung der Machbarkeitsstudie für den Einsatz von Erdwärmesonden als Wärmequelle vernachlässigt. Es wird jedoch notwendig sein, das mögliche Auftreten von Grundwasser während der Feldarbeiten zu beobachten und zu dokumentieren.

Das geothermische Modell des Beispielgebietes wird durch horizontale Tiefenschnitte der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Gesteine dargestellt. Das Modell weist nur geringe vertikale und horizontale Schwankungen auf. Der resultierende Mittelwert liegt im untersuchten Tiefenbereich bei ca. $2,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei absolut minimalen Abweichungen.

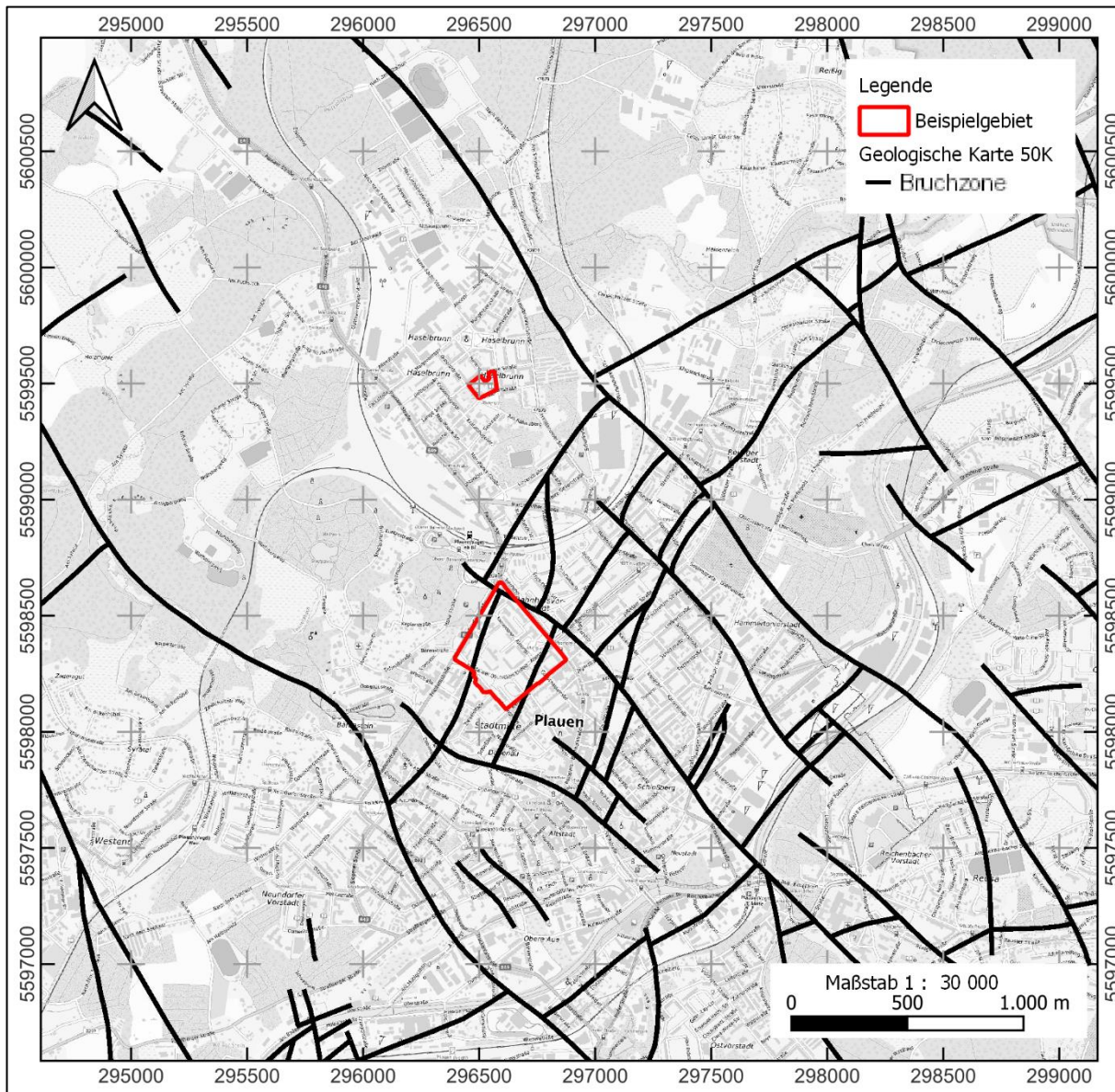
4.2.2.3 Bahnhofsvorstadt

Die geologische Situation des Beispielgebiets Bahnhofsvorstadt ist ähnlich wie die des Beispielgebiets Rückert Campus. Das geologische 3D-Modell definiert in diesem Gebiet nur die Schuppenzone (Einheit 34), die von mehreren Metern anthropogenen Sediments überlagert wird (Abbildung 22). Obwohl das geologische Modell keine Störungstektonik im Beispielgebiet oder seiner Umgebung definiert, lassen sich auf der geologischen Karte 1 : 50.000 von Plauen eine Vielzahl lokaler Verwerfungen der Sudeten in N-S-Richtung (Sudeten-Richtung) nachzeichnen, die von weniger ausgeprägten Verwerfungen der E-W-Richtung (Erzgebirger-Richtung) begrenzt werden (Abbildung 23). Die N-S-Verwerfung ist auch entlang der östlichen Grenze des Beispielgebietes Bahnhofsvorstadt kartiert worden. Wenn das Verwerfungssystem des Beispielgebiets wasserführend ist, kann dies zu einer erheblichen Inhomogenität der thermischen Eigenschaften der Gesteinsumgebung führen, die in dem verwendeten geologischen Modell nicht zum Ausdruck kommt und folglich auch nicht in das geothermische Modell des Beispielgebiets einfließt. Dieses Wissen muss bei der Planung und Bewertung von Erkundungsarbeiten im Feld, insbesondere beim TRT, berücksichtigt werden. Sollte die Pilotbohrung auf ein wasserführendes Störungssystem stoßen, könnte ein TRT höhere Wärmeleitfähigkeitswerte für das gesamte Beispielgebiet liefern und damit die Funktionseigenschaften über die Gesamtlänge der installierten Erdwärmesonden erheblich beeinflussen.



Quelle: GEOPLASMA-CE, 2019

Abbildung 22: Geologisches 3D-Modell des Beispielgebiets Bahnhofsvorstadt (nach GeoPLASMA-CE und LOD2)



Quellen: BKG, 2023, BGR, 2019

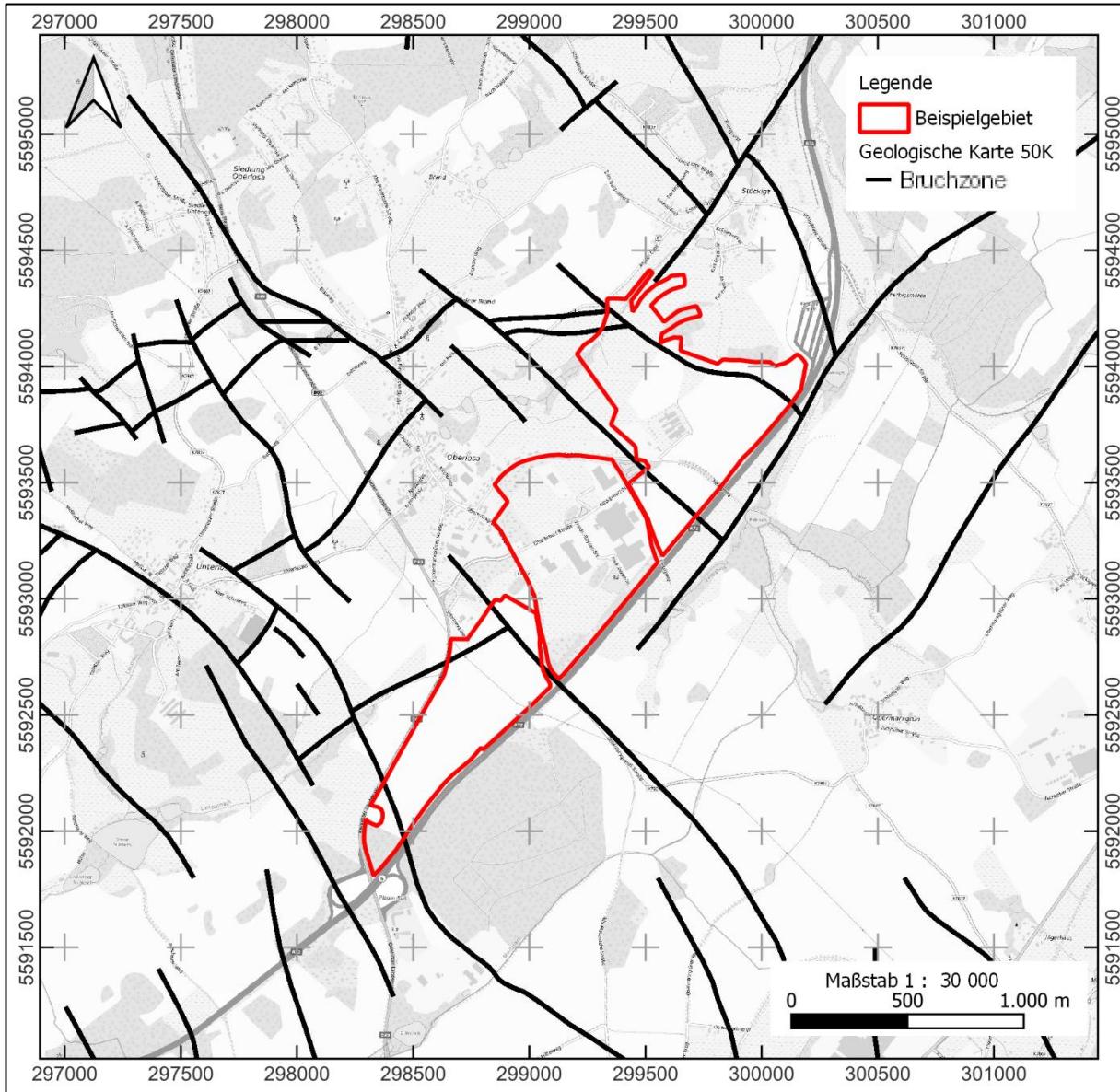
Abbildung 23: Tektonische Strukturen um die Beispielgebiete Rückert Campus und Bahnhofsvorstadt

4.2.2.4 Oberlosa

Das geothermische Modell für das Beispielgebiet Oberlosa wurde individuell entwickelt, da die geologische Situation hier variabel ist. Im westlichen Teil (Beispielgebiet Oberlosa 1 und der größte Teil des Beispielgebiets Oberlosa 2a) zeigt das geologische 3D-Modell eine einfache geologische Struktur, die von der Schuppenzone (Einheit Nr. 34) dominiert wird. Im Beispielgebiet Oberlosa 1 wird diese nur lokal von einer geringmächtigen Schicht von Schwemmsedimenten überlagert. Diese bestehen aus alluvialen feinklastischen (Einheit Nr. 3) und alluvialen grobklastischen Sedimenten (Einheit Nr. 4). Im östlichen Teil (Oberlosa 2b) werden die tektonisch begrenzten Körper der Phyllite (Einheit Nr. 26) und der

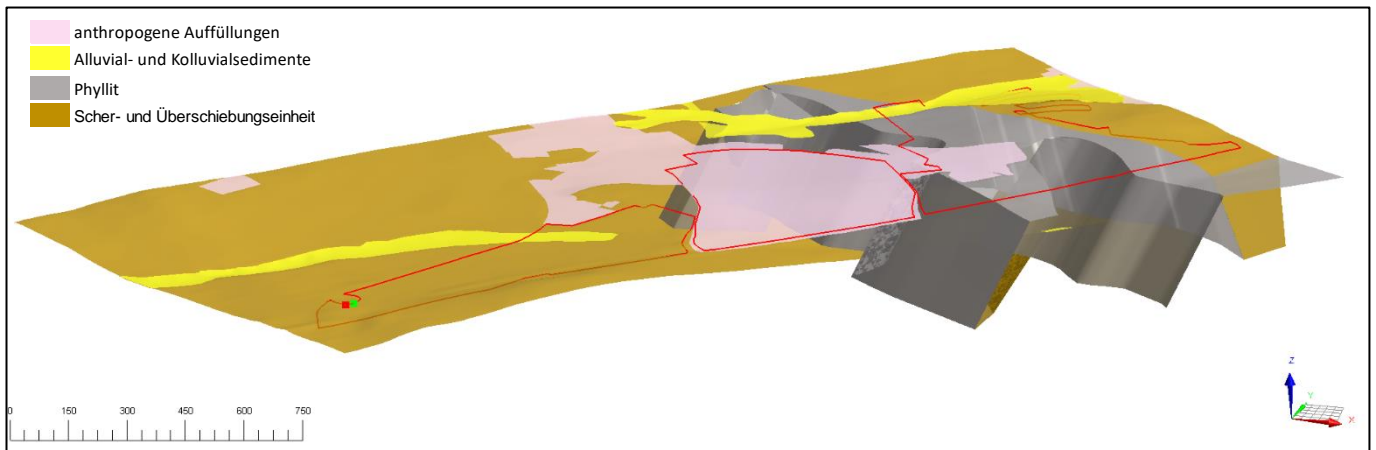
Schuppenzone wahrscheinlich nur im Norden des Beispielgebiets durchschnitten und von einer dünnen Schicht alluvialer und kolluvialer Sedimente (Einheiten Nr. 3, 4 und 5) überlagert (Abbildung 25). Die Vorstellung einer tektonischen Begrenzung der Einheiten wird durch den Verlauf der in den geologischen Karten eingezeichneten Verwerfungslinien unterstützt (Quellen: BKG, 2023, BGR, 2019

Abbildung 24). Die Schnittstelle der beiden Einheiten entspricht im Allgemeinen den tektonischen Hauptrichtungen des Gebiets, wobei die Sudetenrichtung (N-S) vorherrscht. Die Gesteinsgrenzen der Sudetenrichtungen fallen meist in einem Winkel von etwa 60° nach Südwesten, nur die westlichste Grenze der Phyllite fällt in demselben Winkel nach Nordosten. Der Vergleich des geologischen 3D-Modells mit der geologischen Karte zeigt, dass die lokale Entwicklung der Phyllite um das Oberlosa-Beispielgebiet durch die silurischen Kiesel- und Alaunschiefer repräsentiert wird. Der lokale Aufschluss der Schuppenzone wird durch den spilitisierten Mikrogabbro, Spilite und Spilituffe, Kiesel- und Alaunschiefer aus dem Devon repräsentiert. Die stratigraphische Überlagerung der beiden Einheiten und die Ausrichtung ihrer Grenzflächen deuten darauf hin, dass beide Formationen zumindest in einem lokalen Extensionsregime entstanden sind. Verwerfungen, die im Dehnungsregime entstanden sind, neigen dazu, offen zu bleiben, sofern sie nicht durch eine signifikante Änderung der Druckverhältnisse aufgefüllt bzw. reaktiviert werden und können bedeutende prädisponierte Grundwasserströmungswege bilden. Die Kluftbewässerung der spezifischen Verwerfungslinien im Gebiet ist aus den verwendeten Lagerstätten nicht ablesbar. Durch die Auswertung von Feldarbeiten (Pilotbohrung und TRT) in den Oberlosa-Beispielgebieten kann eine genauere Einschätzung der vorhandenen Untergrundsituation erfolgen.



Quellen: BKG, 2023, BGR, 2019

Abbildung 24: Tektonische Struktur um die Oberlosa-Beispielgebiete 1, 2a und 2b



Quelle: GEOPLASMA-CE, 2019

Abbildung 25: Geologisches 3D-Modell des Beispielgebiets Oberlosa (nach GeoPLASMA-CE und LOD2)

4.2.3 Untergrundtemperaturmodell

Die Grundlagen und Ausgangspunkte für die Ermittlung der Temperaturverteilung wurden im Kapitel 4.2.2 dargestellt. Die Temperaturverteilung wurde als lineares 1D-Modell (Gleichung in Anlehnung an das Simulationstool Earth Energy Designer (EED)) modelliert.

$$T(z) = T(0) + \frac{q_{geo}}{\lambda} \cdot z \quad (1)$$

$T(z)$ Mittlere Untergrundtemperatur in Tiefe z [$^{\circ}C$]

$T(0)$ Mittlere Oberflächentemperatur [$^{\circ}C$]

q_{geo} Wärmefluss [W/m^2]

λ Wärmeleitfähigkeit [$W/(m \cdot K)$]

z Tiefe [m]

Für die Ableitung der Eingangsparameter des Modells wurden folgende Informationen herangezogen:

- Karte der durchschnittlichen Oberflächentemperatur (Projekt GeoPLASMA-CE),
- Gesteinstemperaturmodell für die Höhengiveaus 0 und - 500 m N.N. (LIAG-Modell),
- durchschnittliche Oberflächentemperaturen und Wärmestromwerte der EED-Datenbank,
- in Literatur angegebene Wärmeflusswerte und
- gemessene Temperaturprofile in der Umgebung der Beispielgebiete.

Abbildung 26 zeigt eine Lösungsvariante des Temperaturmodells. Die farbigen Kurven stellen die Messungen der Temperaturprofile um die Beispielgebiete dar und die grauen Kurven die Messungen in der

weiteren Umgebung. Die rot gepunktete Linie definiert die polynomiale Annäherung der durchschnittlichen Oberflächentemperatur zweiter Ordnung und der beiden obersten Schichten des LIAG-Modells und der hellblaue Graph das lineare Modell des Temperaturprofils der Felsumgebung um die Beispielgebiete. Auf der Grundlage der Datensynthese wurde die durchschnittliche Oberflächentemperatur des Gebiets auf 9 °C festgelegt. Für diese Temperatur wurde auf Basis des Temperaturgradienten der gemessenen Temperaturprofile und des LIAG-Temperaturmodells ein entsprechender Wärmeflusswert von 45 mW/m² ermittelt. Dieser Wert ist zwar deutlich niedriger als der Wert in der EED-Datenbank und die in der Literatur für das Vogtland allgemein angegebenen Werte (55 – 60 mW/m²), kann aber die lokal beobachtete Temperaturentwicklung der obersten Teile der Lithosphäre in dieser Region besser wiedergeben.

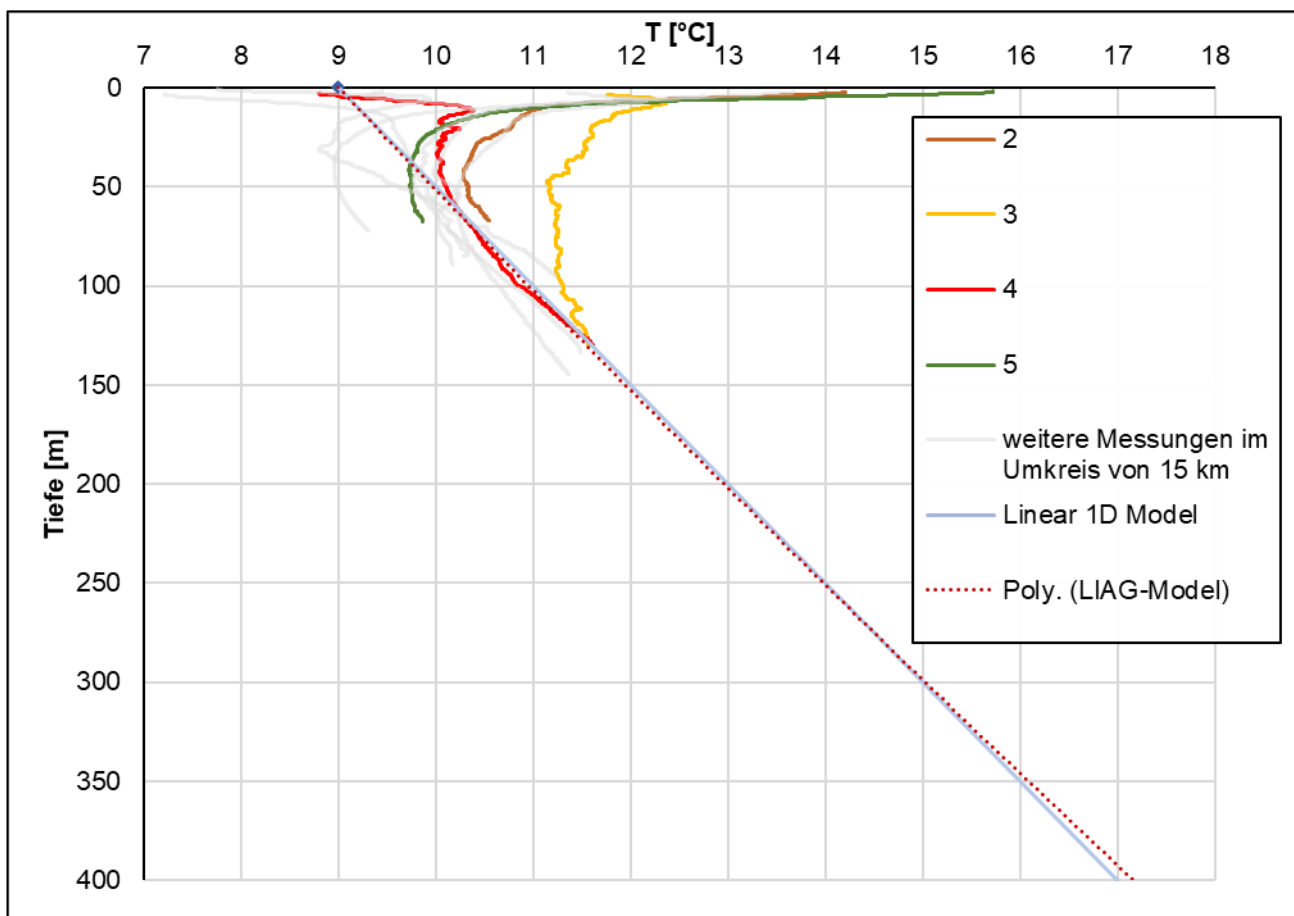
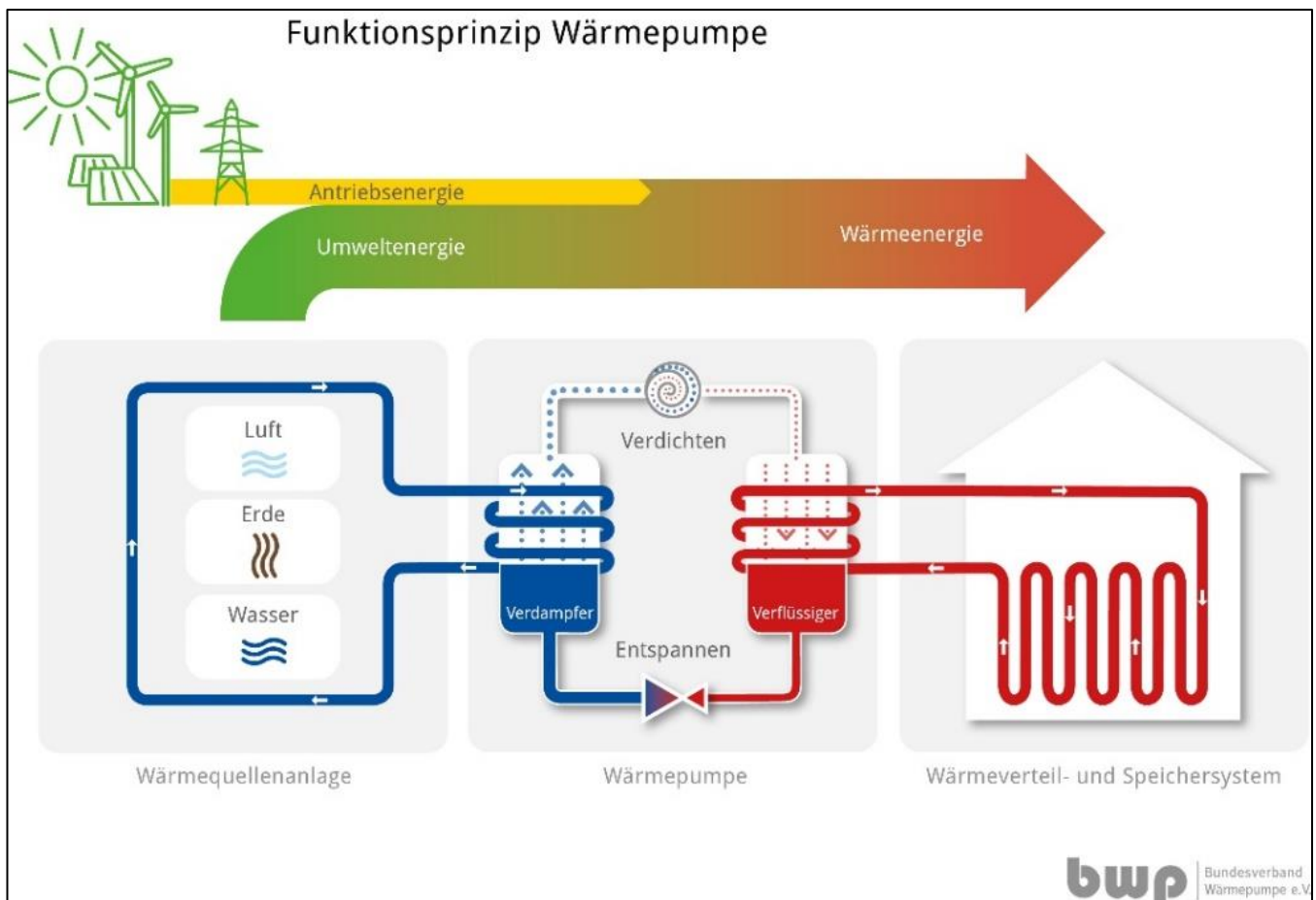


Abbildung 26: Konstruktion eines 1D-Temperaturmodells

5 Technische Grundlagen

5.1 Wärmepumpe

Die Wärme, die dem Erdreich entnommen wird, liegt auf einem Temperaturniveau vor, welche nicht für die Heizung und Warmwasserbereitung direkt genutzt werden kann. Mittels Wärmepumpen (WP) wird dem, in den Sonden zirkulierenden, Wärmeträgermittel Wärme entzogen und unter dem Einsatz elektrischer Energie auf ein nutzbares Temperaturniveau angehoben. Das abgekühlte Wärmeträgermittel wird im geschlossenen Kreislauf in den Sonden wieder in die Erde gefördert, um erneut erwärmt zu werden.



Quelle: BWP, 2024

Abbildung 27: Funktionsprinzip Wärmepumpe

In der dargestellten Abbildung 27, des Prinzips der Kompressionswärmepumpe, geht hervor, dass sich die bereit gestellte Wärmemenge für das Gebäude aus elektrischer Antriebsenergie und entzogener Umweltwärme addiert. Umweltwärme wird in diesem Fall ausschließlich aus der Geothermie gewonnen. Im Folgenden werden Absorptions- / Adsorptions- und Vuilleumier-Wärmepumpen vernachlässigt.

Zur Anhebung des Temperaturniveaus wird ein Verdichter genutzt. Ein Kältemittel wird auf der Verdampferseite gasförmig, indem es der Wärmequelle (hier den Erdwärmesonden) Wärme abnimmt. Das

Gas kann im Verdichter komprimiert werden und erhöht dadurch seine Temperatur. Das hohe Temperaturniveau kann an die Wärmeübergabesysteme (Heizung / Warmwasser) mittels des Verflüssigers abgegeben werden. Damit sich der Kreislauf schließt wird das Kältemittel am Expansionsventil entspannt, sodass der Joule-Thompson-Effekt eintritt. Das Druckniveau sinkt, damit das Kältemittel zur optimalen Wärmeübergabe wieder in der flüssigen Phase vorliegt. Der Kreislauf beginnt erneut.

Die eingesetzte elektrische Energie des Verdichters zur Kompression und zur Überwindung des Druckverlustes am Expansionsventil bestimmt maßgeblich die Effizienz der Wärmepumpe.

5.1.1 Effizienz einer Wärmepumpe

Die Effizienz einer WP in einem Arbeitspunkt kann mittels der Leistungszahl (COP) beschrieben werden. Sie berechnet das Verhältnis der abgegebenen Heizleistung (Q_H) zum Stromeinsatz (P_{el}).

$$\varepsilon_{WP} = \frac{Q_H}{P_{el}}$$

Wird die Effizienz über einen längeren Zeitraum ausgewiesen, z.B. Jahresarbeitszahl (JAZ / SCOP) wird der Bilanzkreis erweitert und auch Antriebs- und Hilfsenergien mit einberechnet.

Soll die Effizienz einer WP gesteigert werden, muss der Stromeinsatz gesenkt und somit mehr Umweltenergie bezogen werden. Das ist in den physikalischen Grenzen des Carnot-Wirkungsgrades möglich.

$$COP_{Carnot} = \frac{T_{senke}}{\Delta T_{Hub}} = \frac{T_{Heizkreis}}{T_{Heizkreis} - T_{Geothermie}}$$

Der Carnot-Wirkungsgrad (COP_{Carnot}) beschreibt die Effizienz eines ideal ablaufenden Carnot-Kreisprozesses für Wärme-Kraft-Maschinen.

Als Abschätzung kann folgende hilfreiche Formel der VDI 4640-2 (VDI, 2019) verwendet werden: Bei Anstieg des Temperaturhubes (ΔT_{Hub}) um 1 K sinkt die Effizienz der WP um ca. 2,5 %.

Soll die Effizienz (COP) der Maschine gesteigert werden, können folgende Maßnahmen ergriffen werden:

- Heizkreistemperaturen senken,
- Temperatur der Wärmequelle erhöhen,
- geringe Temperaturverluste an den Wärmetauschern.

Für die saisonale Betrachtung sollte der Stromeinsatz mit folgenden Parametern optimiert werden:

- Wirkungsgrad Antriebsmotor,

- effizienter Kompressor,
- geringe Stromeinsätze der Zusatzaggregate.

Der sinkende Wirkungsgrad für sinkende Quelltemperaturen ist in folgender Abbildung dargestellt.

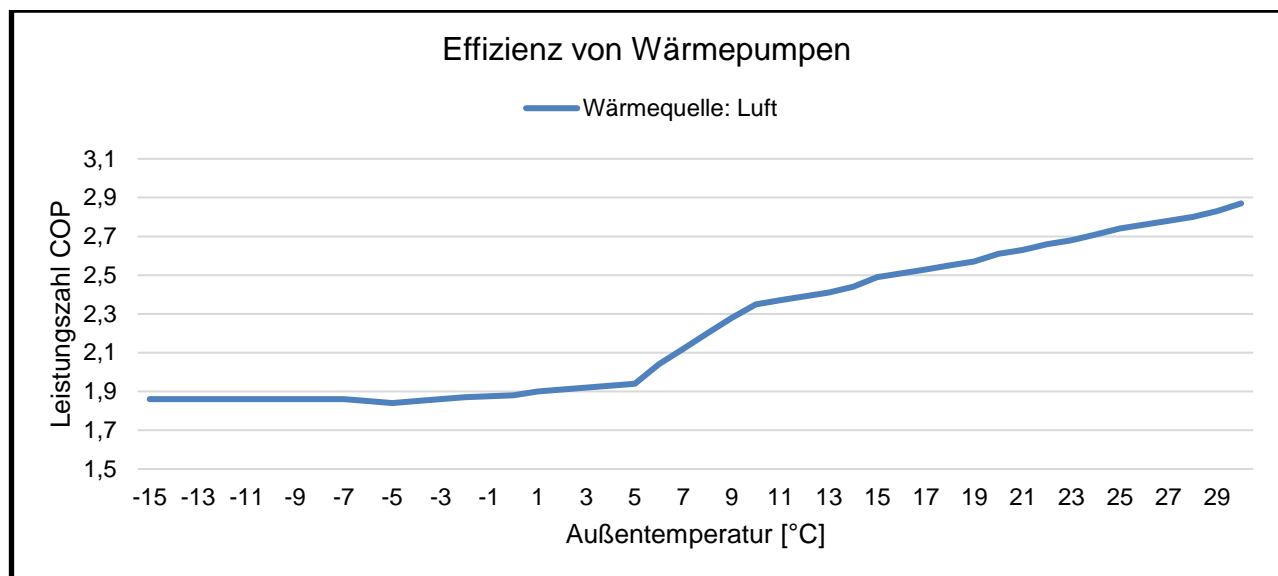


Abbildung 28: Abhängigkeit COP von der Quelltemperatur einer realen Luftwärmepumpe (Carrier)

Die Abbildung 28 zeigt beispielhaft die Kennlinie für eine Wärmepumpenkaskade von Carrier, die eine Vorlauftemperatur von 75°C erzeugt.

Die Effizienz der WP in jedem Arbeitspunkt (COP) bestimmt wie hoch das Verhältnis von Antriebsenergie zu bereitgestellter Wärmemenge in der Jahressumme (SCOP/JAZ) ist. Je mehr elektrische Energie das System benötigt, umso weniger wird die geothermische Quelle belastet, wenn die bereitgestellte Wärmemenge gleichbleibt. Für die Dimensionierung der Geothermieanlage ist die Effizienz der WP zu berücksichtigen.

5.1.1.1 Regeneration des Untergrundes

Beim Heizen von Gebäuden wird dem Untergrund durch geothermische Nutzung Wärme entzogen, was zu einer Abkühlung des Untergrunds führt. Besonders bei Gebäuden oder Quartieren mit hohem Heizbedarf kann sich die Temperatur des Untergrunds nur begrenzt durch natürliche Prozesse regenerieren. Durch das Einbringen von Wärme in den Untergrund während der Sommermonate kann dieser proaktiv wieder aufgewärmt werden. So fungiert der Untergrund als eine Art Wärmespeicher, der die im Sommer aufgenommene Wärme im Winter wieder abgeben kann.

Die Möglichkeiten zur thermischen Regeneration des Untergrunds sind sehr projektspezifisch und erfordern eine Betrachtung des gesamten Energiekonzepts eines Bauvorhabens. Grundsätzlich ist es vorzuziehen, überschüssige Wärme aus industriellen Prozessen oder Kühlanforderungen von Gebäuden und technischen Systemen in den Untergrund einzubringen. Bei einer passiven Kühlung wird beispielsweise nur der Betrieb von Umwälzpumpen im Primär- und Sekundärkreislauf benötigt, um Wärme aus den Gebäuden in den Untergrund zu leiten. Der Untergrund kann auch aktiv durch die Einbringung von Wärme aus dem Betrieb von Luftkühlern oder Solarthermie-Anlagen regeneriert werden. Diese zusätzlichen technischen Anlagen können sowohl zur thermischen Regeneration des Untergrunds als auch als zusätzliche Wärmeerzeuger dienen. Umweltwärmequellen, die zur Regeneration genutzt werden könnten, werden in den folgenden Kapiteln aufgezeigt und verglichen.

Wenn die aus dem Untergrund entnommene und zugeführte Wärmemenge pro Betriebsjahr etwa gleich groß ist, spricht man von einer ausgeglichenen thermischen Balance. Im Allgemeinen hat die Annäherung an eine thermische Balance in der Planung einer Erdwärmeanlage positive Effekte. Besonders bei großen Anlagen führt dies zu einer kleiner dimensionierten Wärmequelle, geringerem Platzbedarf und Verbesserungen in der Anlageneffizienz. Dadurch verringern sich die Investitions- und Betriebskosten der geothermischen Anlage. Es ist daher ratsam, die relevanten Szenarien für den Betrieb der geothermischen Anlage bereits zu Beginn des Planungsprozesses zu erörtern.

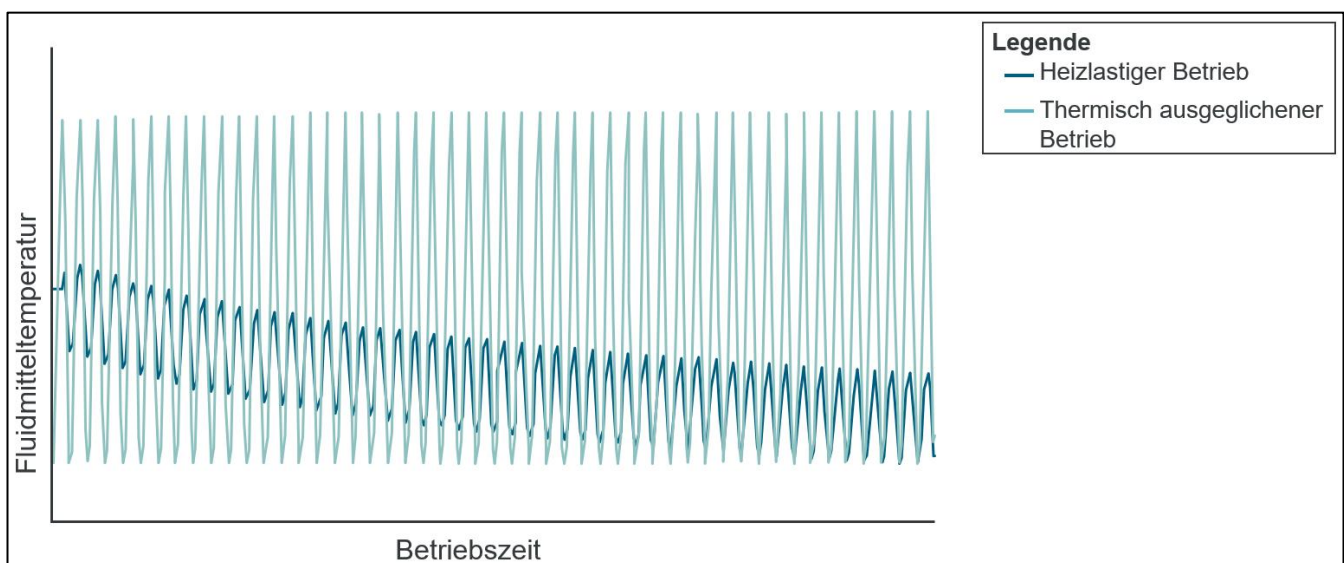


Abbildung 29: Schematische Darstellung des Einflusses der Sondenregeneration auf die Untergrundtemperatur

5.1.2 Weitere Umweltwärmequellen

Ein geschlossenes oberflächennahes geothermisches System besitzt, wie in Kapitel 5.1.1.1 erläutert, die Eigenschaft sinkender Quelltemperaturen bis hin zur Vereisung, bei zu hohen Wärme-Entzugsmen-

gen. Um diesem Effekt entgegenzusteuern, das geothermische System möglichst klein zu dimensionieren und die Effizienz und Haltbarkeit des verwendeten Wärmepumpensystems zu steigern, kann es je nach Potenzial von Vorteil sein, weitere Wärmequellen einzubinden. Übergeordnetes Ziel ist dabei immer die Verschiebung von Wärmemengen aus der jeweiligen Quelle in die Heizperiode (Speicher-Effekt) und somit die Regeneration der geothermischen Quelle für langfristig stabile und hohe Quelltemperaturen.

5.1.2.1 Solarthermie / Photovoltaik-Thermie (PVT)

Die Nutzung der Sonneneinstrahlung mittels Solarthermie oder PVT-Kollektoren durch Erwärmung eines Fluids bietet Temperaturniveaus, die deutlich über dem der Geothermie liegen können. Beide nutzen die Sonneneinstrahlung je nach Übertemperatur zu einem höheren Anteil als Photovoltaikmodule und bieten daher im Vergleich eine höhere Dichte für Leistung und Ertrag je Fläche. Bedingt durch die Notwendigkeit eines zirkulierenden Fluides sind die Investitions- und Betriebskosten höher, als für PV-Module.

Solarthermie-Kollektoren weisen ertragspezifisch hohe Investitionskosten auf und liefern ein hohes Temperaturniveau. Aus diesem Grund werden sie häufig unterstützend im EFH-Bereich oder zentral einbindend in der Fernwärme eingesetzt. Da im Sommer sehr hohe Erträge durch eine Solarthermieanlage generiert werden, jedoch zu dieser Zeit ein geringer Wärmebedarf vorliegt, besteht die Gefahr der Überhitzung, einer sogenannten "Ausdampfung" von Solarthermieanlagen. Aus diesem Grund können Solarthermieanlagen nur in Kombination mit entsprechend dimensionierten Wärmespeichern betrieben werden, um Wärme auch zu Zeiten geringen Bedarfs abführen zu können.

PVT-Kollektoren sind photovoltaisch-thermische Kollektoren und bestehen aus einem PV-Modul, welches rückseitig mittels Wärmetauscher gekühlt werden. Der rückseitige Wärmetauscher hat große Ähnlichkeit mit einem ungedämmten Solarkollektor, welcher von einer frostschutzmittelhaltigen Flüssigkeit durchströmt wird. Es wird Strom erzeugt und Wärme bereitgestellt. Da die Kollektoren ungedämmt sind, sind die Fluidtemperaturen deutlich geringer als bei Solarthermieanlagen, weshalb die Gefahr der Ausdampfung in der Regel im Sommer nicht besteht. Zudem kann beispielsweise bei der Regeneration von EWS und sehr niedrigen Fluidtemperaturen Wärme aus der Luft über PVT-Kollektoren aufgenommen werden. Zum erhöhten Wärmeaustausch mit der Luft sind bei manchen Geräten herstellerseitig auf der Rückseite Metalllamellen montiert. Die Investitionskosten von PVT-Kollektoren sind in der Regel hoch. Bei sehr geringer Dachfläche und gering nutzbaren geothermischen Potenzial können sie eine sehr gute Alternative zur Wärmeversorgung einer WP sein, die zusätzlich Strom liefert.

5.1.2.2 Photovoltaik mit Power-to-Heat (PtH)

Photovoltaikmodule weisen einen geringeren Wirkungsgrad (als Solarthermie) von ca. 20% auf, aber geringere Investitionskosten je installierter Leistung. Es kann zu Zeiten hohen PV-Ertrages sinnvoll sein, PtH-Anlagen zur Wärmeerzeugung zu nutzen. PtH-Anlagen wandeln Strom in Wärme (engl.: Power to Heat), mittels elektrischen Widerstands um. Rein wirtschaftlich kann dies sinnvoll sein, wenn erzeugter PV-Strom eine geringe Vergütung erfährt, hingegen aber ein Wärmebedarf besteht, bzw. die Möglichkeit Wärme saisonal oder temporär (z.B. in EWS) zu speichern.

Die elektrische Energie sollte jedoch vorrangig für den Betrieb der WP genutzt werden, um die Nutzung der Umweltwärmequellen zu maximieren. Strom ist die höherwertige Energieform, aufgrund des höheren Vermögens und die höhere Flexibilität, Arbeit zu verrichten.

5.1.2.3 Abwärme / Abwasser

Das Abwasser aus Gebäuden oder auch aus der Umwelt bietet ein Temperaturniveau von ca. 17 °C im Mittel und 10 °C minimal. Zur Nutzung von Abwasser stehen verschiedene Systeme für einzelne Gebäude oder den Abfluss aus ganzen Quartieren zur Verfügung. Das Potenzial ist stark durch das Nutzerverhalten geprägt und meist muss für die Nutzung ein Mindestabfluss zur Verfügung gestellt werden. Es können neue oder Bestandsleitungen für die Potenzialerschließung genutzt werden. Für die Funktion von nachgelagerten Kläranlagen kann ebenfalls eine Mindesttemperatur erforderlich sein, wodurch die Auskühlung evtl. begrenzt ist. Da die Abwasserleitungen zum Großteil unter der Erde verlegt sind, wird ein Anteil an geothermischem Potenzial mit genutzt.

5.1.2.4 Gebäudekühlung

Eine Möglichkeit Wärme zur Regeneration zu gewinnen, ist sie bei Kühlbedarf aus dem Gebäude abzuführen. Um dem Gebäude Wärme zu entziehen gibt es verschiedene Möglichkeiten.

Mit der Gebäudekühlung werden Kühlflächen mit kaltem Medium durchströmt, welches die Raumwärme aufnimmt. Es ist möglich, dafür vorgesehene Heizflächen (z.B. Fußbodenheizung / Flächenheizung) zu verwenden, wenn der Taupunkt und damit der Kondensatanfall überwacht bzw. abgeführt wird.

Dabei kann das Temperaturniveau der Geothermie direkt verwendet werden und das Heizmedium über einen Wärmetauscher (z.B. NC-Box) direkt genutzt werden. Beim Natural-Cooling (NC) wird kein Strom für Kompression eingesetzt, nur die Umwälzpumpen werden betrieben. Das Temperaturniveau entspricht etwa dem der Geothermie. In diesem Kontext wird durch die begrenzte Kühlleistung auch von Temperierung gesprochen.

Wird zusätzlich ein Kühlkreis mit Kompression (z.B. Wärmepumpe invers) genutzt, dann wird aktiv gekühlt und es ist zwingend eine Kondensatabführung notwendig. Die Temperaturniveaus des Kältekreislaufes können dann unterhalb der Geothermie liegen. Da die Wärme überwiegend direkt und indirekt durch Sonneneinstrahlung in das Gebäude gelangt, wird sie im Kapitel Umweltwärme aufgezählt. Ein Teil der Wärme wird auch durch elektrische Verbraucher und Personen in das Gebäude übertragen.

5.1.2.5 Thermische Bauteilaktivierung

Für die thermische Bauteilaktivierung gibt es verschiedene Möglichkeiten. Ähnlich der oberflächennahen Geothermie kann sie als Speicher, oder wie eine Flächenheizung oder -kühlung zur Wärmeübertragung verwendet werden. In jedem Fall werden Rohrleitungen in die Bauteile eingebracht, um Wärme übertragen zu können. Die Aktivierung von Bestandgebäuden und ein nachträglicher Eintrag der Rohrleitung kann durch das Systemgewicht oder Aufbauhöhen begrenzt sein. Die Planung in einen Neubau lässt sich dabei leichter integrieren.

Betonkernaktivierung

Bei der Betonkernaktivierung werden wasserführende Rohrleitungen vor dem Vergießen des Betons eingesetzt. Liegen die Decken oder Wände innerhalb der Gebäudehülle können sie nicht als Umweltwärmequelle dienen, nutzen jedoch die thermische Trägheit (Wärmekapazität) des Betons zur Verschiebung von Wärmemengen ähnlich einer Flächenheizung (siehe Kapitel 5.3.1 und 5.1.2.4). Differenzen der Systemtemperaturen können dabei sehr niedrig gehalten werden. Mittels der Kombination der Betonkernaktivierung mit einer Umweltwärmequelle und WP können Wärmemengen aus Perioden hohen Potenzials in Perioden mit hohem Bedarf verschoben werden. Ob die Verschiebung von Tag zu Nacht, oder über mehrere Monate erfolgen kann, hängt dabei von der Leistung der Quelle und maßgeblich von der Masse der aktivierten Bauteile ab.

Fundamentaktivierung

Die Aktivierung von Fundamenten in Form einer Grundplatte, Kellerwand oder Pfahlgründung bietet die Möglichkeit die oberflächennahe Geothermie als Quelle oder Speicher zu nutzen. In diesem Fall sind die Mechanismen analog zu den in Abschnitt 5.1.2.4 beschriebenen Systemen.

Einen Sonderfall stellt die Aktivierung von z.B. Parkhäusern dar, die auch Fahrzeuge (Motorabwärme) als Wärmequelle nutzen können.

5.1.2.6 Solare Luftkollektoren

Solare Luftkollektoren (SLK) bestehen in der Regel aus PE-Rohren, die bündelweise auf möglichst unbeschatteten Dachflächen oder erdbodennah montiert sind. Sie werden mit einem Wärmeträger durchströmt und gewinnen Wärme aus solarer Energie und Luftwärme. Ein Vorteil gegenüber Rückkühlern

ist, dass kein schallemittierender Ventilator benötigt wird. Gegenüber gedämmten Solarthermiekollektoren entstehen hohe Wärmeverluste. Während der kalten Jahreszeit nimmt folglich die generierte Wärmemenge deutlich ab. Im Sommerhalbjahr entsteht jedoch der Vorteil, dass das Überhitzungsrisiko deutlich geringer ist.

5.1.2.7 Rückkühler / Luftkühler

Der Einsatz von Rückkühlern dient ursprünglich zum Abführen von Wärme im Kühlfall eines Gebäudes oder beim Anfall von Abwärme. Die Kühlflächen können jedoch auch genutzt werden, um Umgebungswärme aufzunehmen um geothermische Sonden zu regenerieren oder Wärme direkt der WP zur Verfügung zu stellen. Da der Betrieb von Rückkühlern die günstigste Variante zur Sondenregeneration darstellt, wird darauf im Folgenden intensiv eingegangen.

Die Abschätzung der zu installierenden Leistung eines Rückkühlers hängt von verschiedenen Randbedingungen ab:

- minimale Lufttemperatur zur Regeneration,
- Betriebsstunden die im Jahr zur Verfügung stehen (abhängig von Heizgrenze und Wärmepumpenbetrieb),
- Außentemperatur der Luft,
- Volumenstrom / Massestrom der Luft,
- Fluidtemperatur der Sole,
- Volumenstrom / Massestrom der Sole,
- maximale Leistung des Rückkühlers bei geg. Temperatur,
- Wärmemenge, die pro Jahr regeneriert werden soll,
- maximal gewünschte Übertemperatur der Sole gegenüber dem Erdreich zur Regeneration.

Diese Faktoren beeinflussen sich gegenseitig und führen dazu, dass eine grobe Dimensionierung der Anlage komplex wird. Zur Vereinfachung wurde das folgende Modell eines realen Rückkühlers erstellt (Abbildung 30).

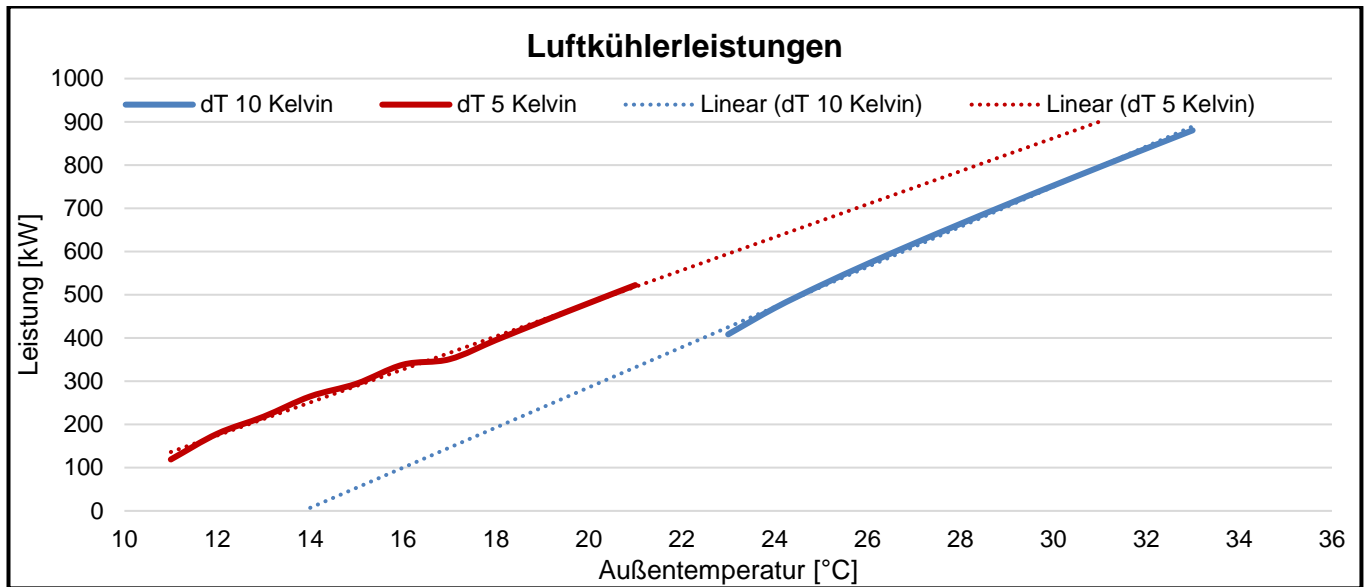


Abbildung 30: Linearisiertes Modell zur Grobdimensionierung der Rückkühler

Für zwei Differenztemperaturen von 5 und 10 Kelvin wurden, auf Basis realer Anlagendaten, Rückkühlleistungen in Abhängigkeit der Außentemperatur linearisiert. Die gewünschte Anlage wird so dimensioniert, dass bei Vorgabe der Maximalleistung, und der zuvor genannten Randbedingungen, die gewünschte Wärmemenge regeneriert werden kann.

Rückkühler zur Sondenregeneration und als Luftwärmepumpe

Die hydraulische Einbindung des Rückkühlers ist für eine Verschaltungsmöglichkeit in Abbildung 31 schematisch dargestellt. Aus der vereinfacht abgebildeten Verschaltung ergeben sich unterschiedliche Betriebsweisen der zwei Wärmequellen Rückkühler (Umgebungsluft) und Geothermie mit der WP.

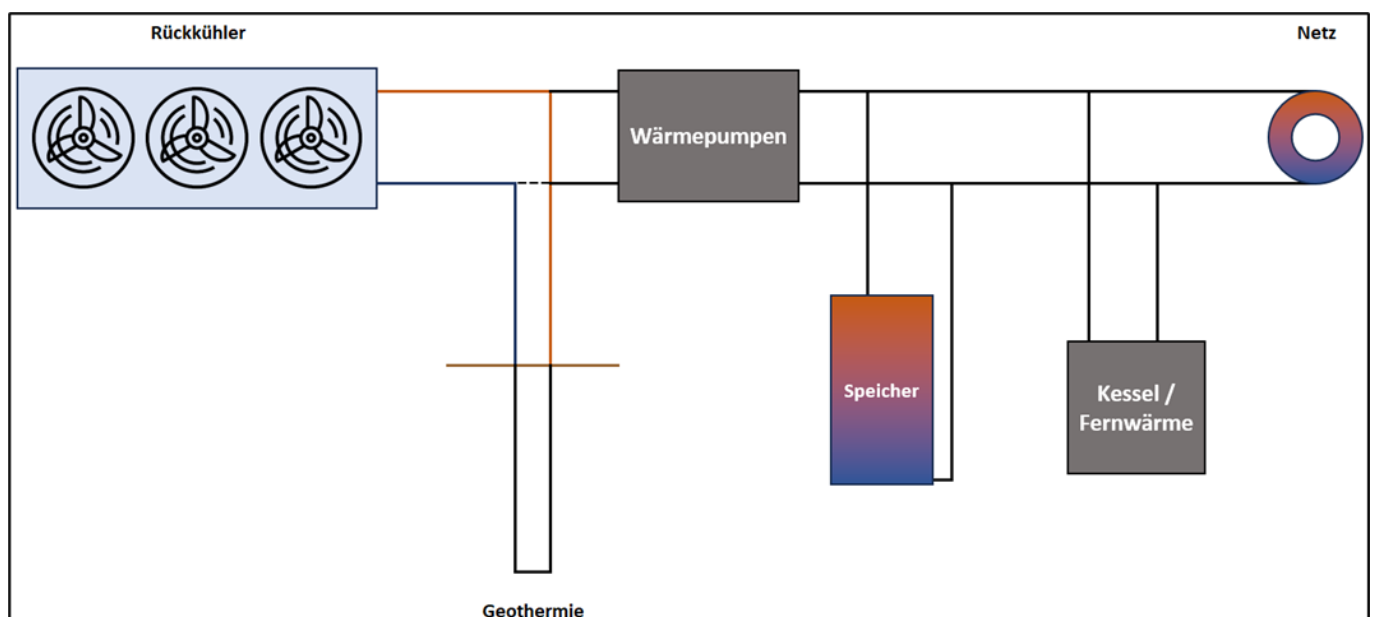


Abbildung 31: Schematische Einbindung Rückkühler in die Geothermie und die Wärmeerzeugung

Der Standardlastfall ist der Heizbetrieb (Abbildung 32 / 1), in dem sich die Wärmepumpe der Geothermie bedient um Wärme ins Netz zu speisen. Wenn die Geothermie-Quelle nach der Heizsaison abgekühlt ist und die Quelltemperaturen der Sonde durch das umliegende, ausgekühlte Erdreich sinken, sinkt auch die Effizienz der WP. Nach der Heizsaison, bei höheren Lufttemperaturen (z.B. Sommer), kann dann der Rückkühler verwendet werden, um das Erdreich zu regenerieren (Abbildung 32 / 2) indem Wärme dem Erdreich zugeführt wird. Der Anteil an Umweltwärme, der aus der Luft gewonnen wird, entspricht dann der Regenerationswärmemenge.

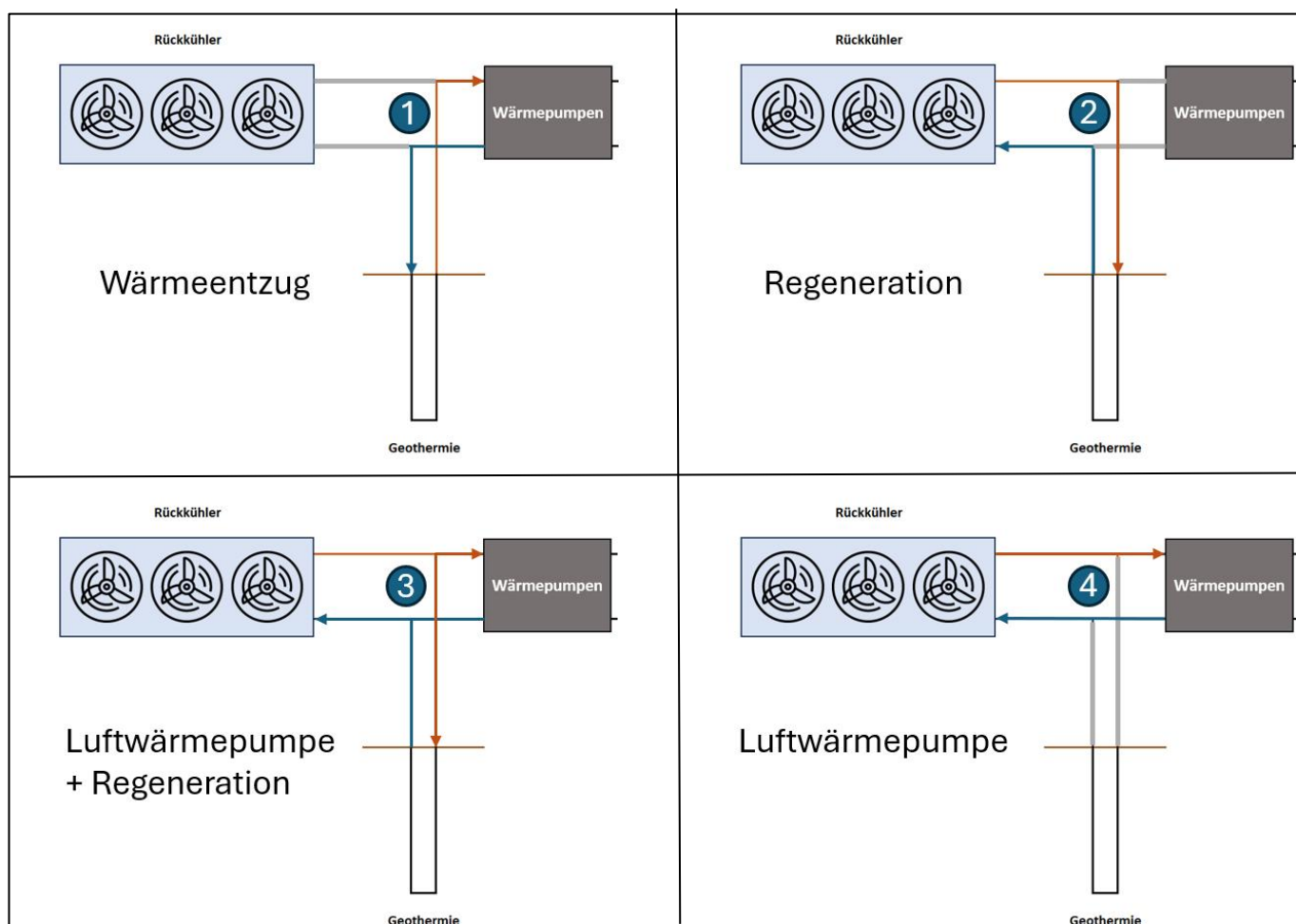


Abbildung 32: Möglichkeiten Betriebsweisen Rückkühler, schematisch

In der Regel weisen die schematisch dargestellten Netze auch einen Bedarf für die Warmwasserbereitung im Sommer auf. So können sich, ab bestimmten Außentemperaturen, Betriebspunkte einstellen, in denen das System gleichzeitig die Geothermie regeneriert und Wärme für das Netz über die WP bereitstellt (Abbildung 32 / 3). In diesem Fall kann es effizienzsteigernd sein, wenn die WP sich direkt der Wärme aus dem Rückkühler bedient, ohne die Wärme vorher über die Geothermie-Sonden durch den Untergrund zu leiten - sie arbeitet als Luftwärmepumpe (Abbildung 32 / 4). Das hat zur Folge, dass die

ab- und zugeführten Wärmemengen und Leistungen der Geothermie gesenkt werden. Das SONDENSYS-TEM kann dadurch kleiner dimensioniert werden. Zusätzlich sind die Quelltemperaturen der Luft in die-SEM Zeitraum höher, als die des SONDENSYS-TEMS. Die Effizienz des Systems steigt.

In Abbildung 33 ist die Quelltemperatur der Geothermie, aus der Simulation für die Bahnhofsvorstadt (mit Regeneration im 50. Jahr), zusammen mit der Außentemperatur beispielhaft dargestellt. Ab Mai bis Oktober liegt die Außentemperatur kontinuierlich über der mittleren Quelltemperatur der Geothermie. In diesem Zeitraum ist der Luftwärmepumpenbetrieb effizienter. Durch den Regenerationsbetrieb steigt die Temperatur im Untergrund bis zum Beginn der Heizsaison wieder an. Ab diesem Zeitpunkt (November) sollte sich die WP wieder aus dem Sondenfeld bedienen, wo die höheren Quelltemperaturen vorherrschen.

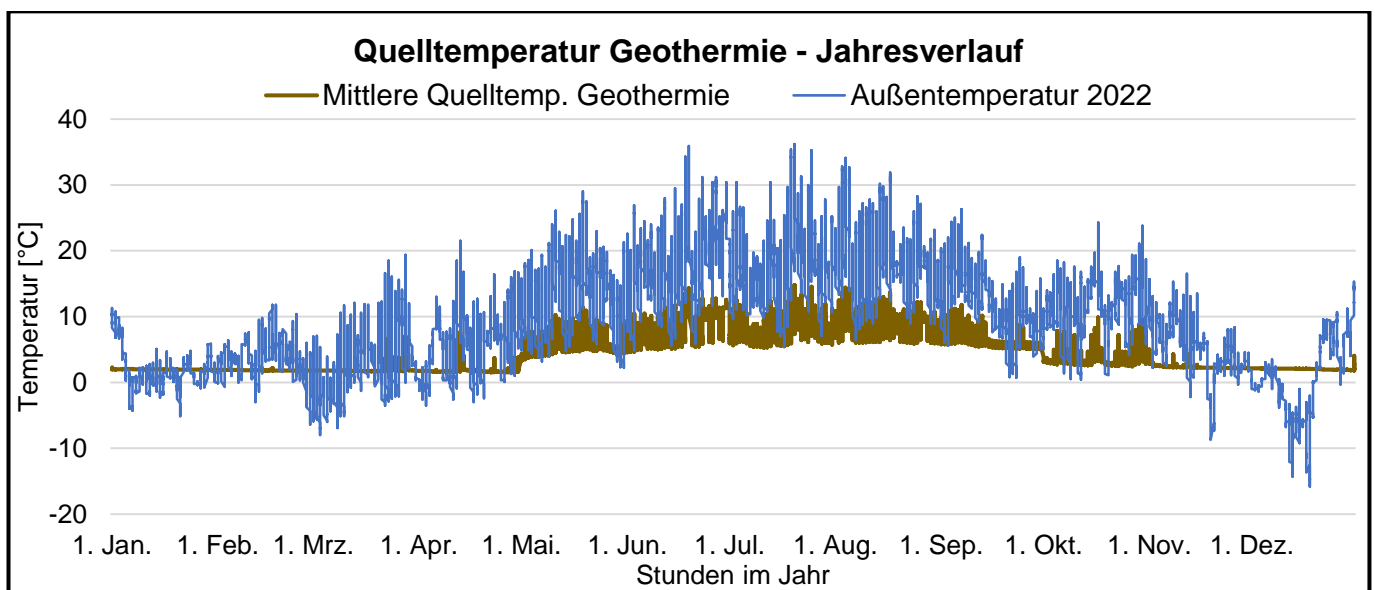


Abbildung 33: Jahresverlauf der Quelltemperatur Geothermie und der Außentemperatur

Aus der vorhergehenden Betrachtung bietet sich, durch die hydraulisch verschalteten Komponenten (Abbildung 31) und die, im Jahresverlauf abweichenden, Quelltemperaturen (Abbildung 33), ein Mischbetrieb der WP als Geothermie- oder Luft-WP an. Zusätzlich ist ein Mischbetrieb des Rückkühlers möglich, indem gleichzeitig ein Teil der Wärme aus der Luft direkt in der WP verwendet wird, während die restliche Wärme den Sonden zur Regeneration zugeführt wird.

Die effizientere Betriebsweise der WP richtet sich, wie beschrieben, nach der jeweiligen Quelltemperatur. Um beide Quellen möglichst wirtschaftlich zu dimensionieren, muss zusätzlich betrachtet werden, wie hoch die Quelltemperaturen in Bezug auf den jeweiligen Wärmebedarf sind. In Abbildung 34 ist beispielhaft ein Lastgang aus der Bahnhofsvorstadt (Teilgebiet Ost) für Warmwasser und Heizung dargestellt, um die schwankenden Bedarfe über das Jahr zu verdeutlichen.

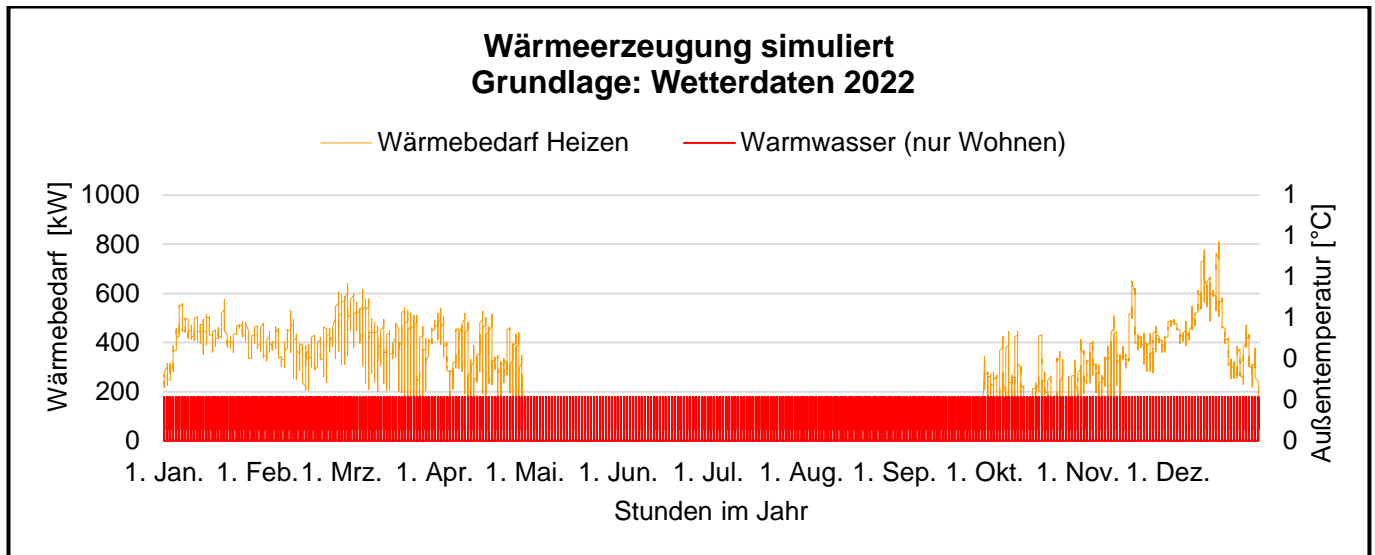


Abbildung 34: Beispiel Wärmelastgang

Zu erkennen ist, dass der Großteil des Wärmebedarfs dann aufkommt, wenn die Außentemperaturen niedrig sind. Die Geothermie in Verbindung mit dem Rückkühler sollte so genutzt werden, dass die Luftwärme aus dem Sommer genutzt wird, um die Sonden zu regenerieren und diese dadurch zum Saisonal-Wärmespeicher werden. Die Rückkühler sollten daher so groß dimensioniert werden, dass sie im Sommer gleichzeitig der WP als Quelle dienen und die Sonden regenerieren können. Das SONDENSYSTEM sollte, aufgrund der vielfach höheren spezifischen Kosten bezogen auf die bereitstellbare Leistung (€/kW), im Vergleich zum Rückkühler möglichst klein dimensioniert werden, um die Investitionskosten gering zu halten.

Einfluss der Fluidtemperaturen mit Teilregeneration auf die Effizienz des Wärmepumpensystems

Wie zu Beginn dieses Abschnitts erläutert, kann ein zu hoher Wärmeentzug den Untergrund nachhaltig auskühlen. Dieser Effekt wird auch bei Teilregeneration der entzogenen Wärmemenge mittels Simulation der mittleren Fluidtemperaturen in den Erdwärmesonden (EED-Simulation) über 50 Jahre erkennbar.

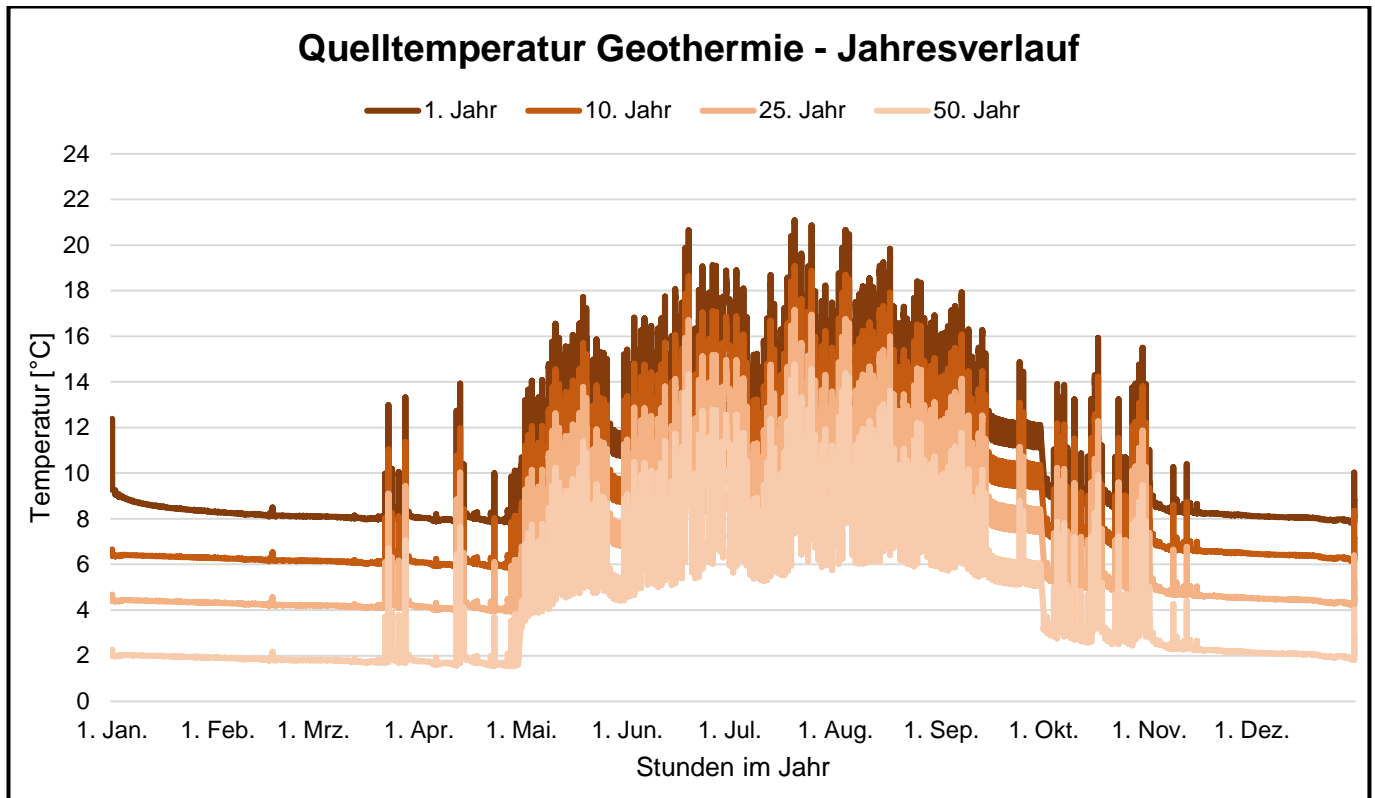


Abbildung 35: Jahresverläufe der mittleren Fluidtemperatur über 50 Jahre bei Teilregeneration

In Abbildung 35 sind die mittleren Quelltemperaturen der Geothermie für das 1., 10., 25. und 50. Jahr dargestellt. Durch den simulierten, jährlich gleichen Wärmeentzug weisen die Zeitreihen gleiche Phasen und Amplituden auf. Die Teilregeneration reicht nicht aus, um eine Abkühlung des Untergrundes über den Betrachtungszeitraum zu verhindern, sodass sich geringere Temperaturen im SONDENSYSTEM einstellen.

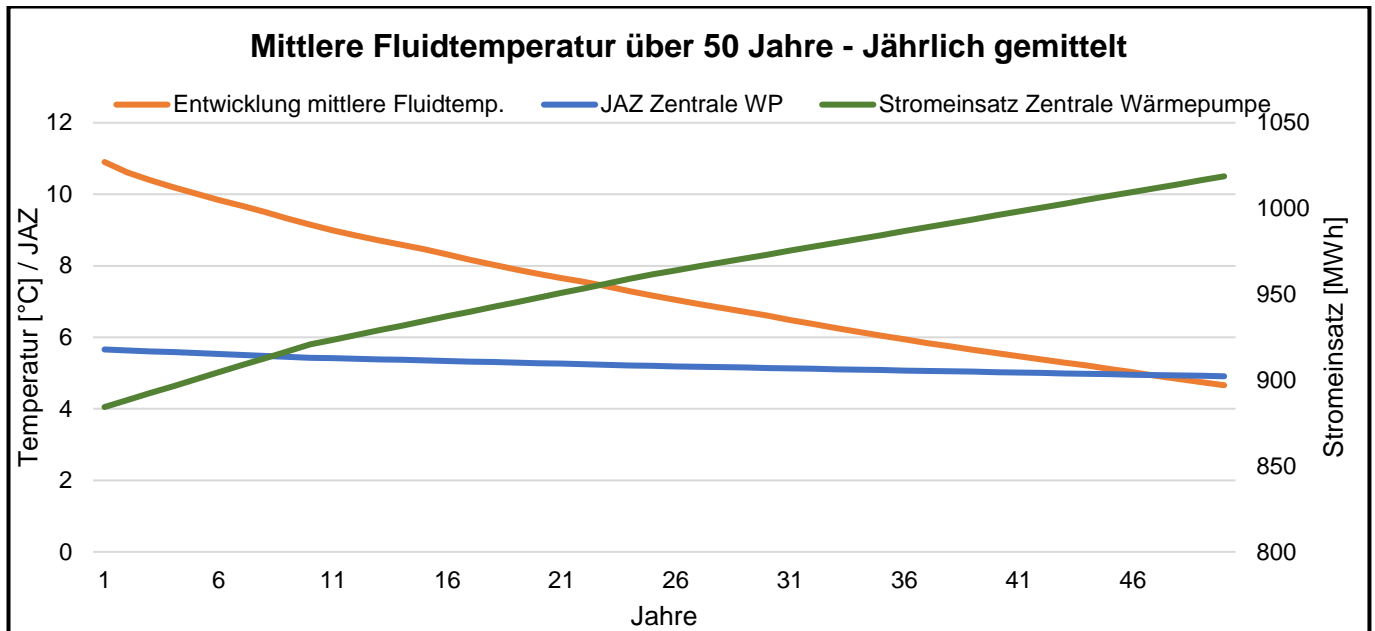


Abbildung 36: Einfluss der Entwicklung der Fluidtemperaturen und dem Strombezug der zentr. WP

Die Abbildung 36 zeigt den Langzeitverlauf der Temperaturentwicklung mit den Jahresmittelwerten aus Abbildung 35. Über den Betrachtungszeitraum wurde eine Minderung der mittleren Fluidtemperatur in den Erdsonden von über 10°C auf unter 5°C simuliert. Mit jedem Jahr sinkt dadurch der COP und die JAZ der zentralen WP, die in der Simulation einen Temperaturhub auf 50 °C realisiert.

In Tabelle 9 sind die Werte der Abbildung 36 aufgelistet. Mit sinkender Effizienz der WP sind höhere Stromeinsätze zu erwarten. Der erneuerbare Anteil sinkt durch den höheren Stromeinsatz minimal.

Tabelle 9: Entwicklung und Einfluss der Fluidtemperatur über 50 Jahre

Jahr	Mittlere Fluidtemperatur [°C]	Stromeinsatz Zentrale Wärmepumpe MWh	JAZ Zentrale WP
1	10,9	884	100%
10	9,1	921	104%
25	7,2	962	109%
50	4,7	1019	115%

5.1.2.8 Vergleich der Umweltwärmequellen zur Regeneration

Das Kapitel 5.1.2 befasst sich mit der Notwendigkeit weitere Umweltwärmequellen, neben der Geothermie, in die Wärmeversorgung einzubinden. Dafür wurden die, in Tabelle 10 dargestellten, Wärmequellen beschrieben und eine qualitative Bewertung vorgenommen. Die Bewertung der Quellennutzung erfolgt aus dem Kontext unterschiedlicher Kriterien. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Unterscheidung in ++ vorteilhaft, + eher vorteilhaft, - eher nachteilig und -- nachteilig nur eine grobe Einteilung widerspiegelt. Vorteilhaft im Kontext der Aufstellfläche bedeutet beispielsweise, dass ein geringer Flächenbedarf besteht.

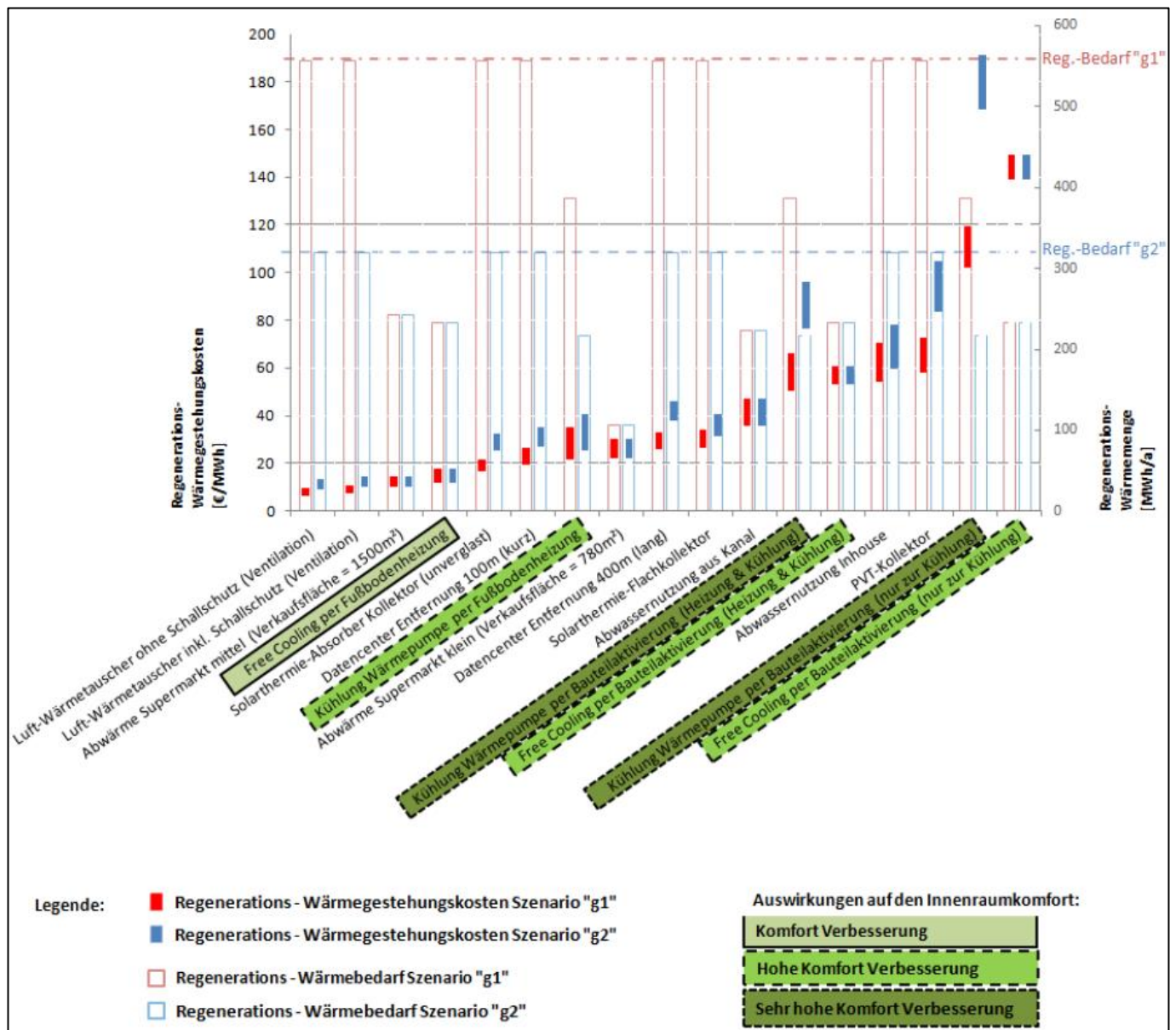
Projektabhängig kann die Bewertung unter den genannten Kriterien unterschiedlich ausfallen, oder andere, nicht aufgeführte Kriterien von Relevanz sein. Projektabhängig ist des Weiteren eine Gewichtung der einzelnen Kriterien aus Tabelle 10 vorzunehmen. Beispielsweise können an einzelnen Standorten die Kriterien der Aufstellfläche und Belastung von Schutzgütern von sehr hoher Relevanz sein, hingegen aber die Höhe der Investitionskosten geringe Bedeutung haben. In wiederum anderen Projekten kann die Relevanz von genau umgekehrter Reihenfolge sein. Entsprechend der Relevanz der Bewertungskriterien ist folglich eine Gewichtung vorzunehmen, um ein projektspezifisches Vergleichsergebnis zu generieren.

Tabelle 10: Vergleich von Umweltwärmequellen zur Regeneration von Erdwärmesonden

		Luft/ Rückkühler	Solarthermie	PVT	P2H+PV	Abwasser	Bauteilaktivierung
Energiegewinnung und Flächen	erf. Aufstellfläche	++	-	-	++	++	-
	erf. zu installierende Leistung [kW/MWh]	+	--	-	++	++	+
	Temperaturniveau	+	-	+	-	+	+
	Lastgangtauglichkeit	+	-	++	++	++	+
Einbindung und Betrieb	Hydraulische Einbindung	+	-	-	+	-	-
	Speicherbedarf/ Regelbarkeit	+	--	-	+	+	+
	Betriebssicherheit/ Wartungsaufwand	+	-	-	+	-	+
Planung und Genehmigung	Belastung von Schutzgütern	--	+	+	+	+	+
	Genehmigungsaufwand	-	+	+	-	--	+
	Abhängigkeit von Externen	+	+	+	+	-	+
Kosten	Investitionskosten [€/MWh]	++	-	--	+	/	/
	Wärmegestehungskosten [€/MWh]	++	-	--	+	/	/

Notation: ++ vorteilhaft, + eher vorteilhaft, - eher nachteilig, -- nachteilig, / extrem projektabhängig

Für verschiedene Systemanforderungen kann ein Quellsystem optimal sein. Die Wärmequelle Luft ist dabei in den meisten Fällen am günstigsten (Abbildung 37) zu erschließen. Rückkühlersysteme werden jedoch mit Ventilatoren betrieben, die Schall emittieren. Alternativ können gegebenenfalls solare Luftkollektoren (SLK) ohne Ventilator genutzt werden. PtH-Anlagen stellen eine günstige Ergänzung dar, sollte eine PV-Anlage mit Überschussproduktion vorhanden sein. Abwassernutzung und thermische Bauteilaktivierung lassen sich beim Neubau gut integrieren, sind in den Bestand jedoch schwer zu implementieren und aus diesem Grund auch in den Kosten erschwert zu kalkulieren. Die Solarthermie stellt eine Lösung dar, die erst in großer Skalierung kosteneffizient wird und dann aber, aufgrund des hohen Temperaturniveaus, für eine Fernwärmeeinspeisung geeignet ist.



Quelle: BMK, 2019

Abbildung 37: Regenerationssysteme: spezifische Wärmekosten verschiedener Wärmequellen

Die Abbildung 37 zeigt verschiedene Umwelt- und Abwärmequellen. Die spezifischen Kosten je MWh wurden dabei für 2 verschiedene Bedarfsszenarien in urbanen Wohngebieten ermittelt und sind nach einer "Merit-Order" entlang der horizontalen Achse geordnet. Dabei wird die Reihenfolge beginnend mit den niedrigsten Kosten aufgestellt. Es ist eine Bandbreite der Kosten und eine maximal mögliche Regenerationsmenge dargestellt. Luft-Wärmetauscher sind mit unter 10 €/MWh günstiger zu erschließen als z.B. Solarthermiepotenziale und bieten zusätzlich, unter Maßgabe der erforderlichen Außentemperatur, ein unerschöpfliches, nicht nutzerabhängiges Potenzial.

5.1.3 Kältemittel

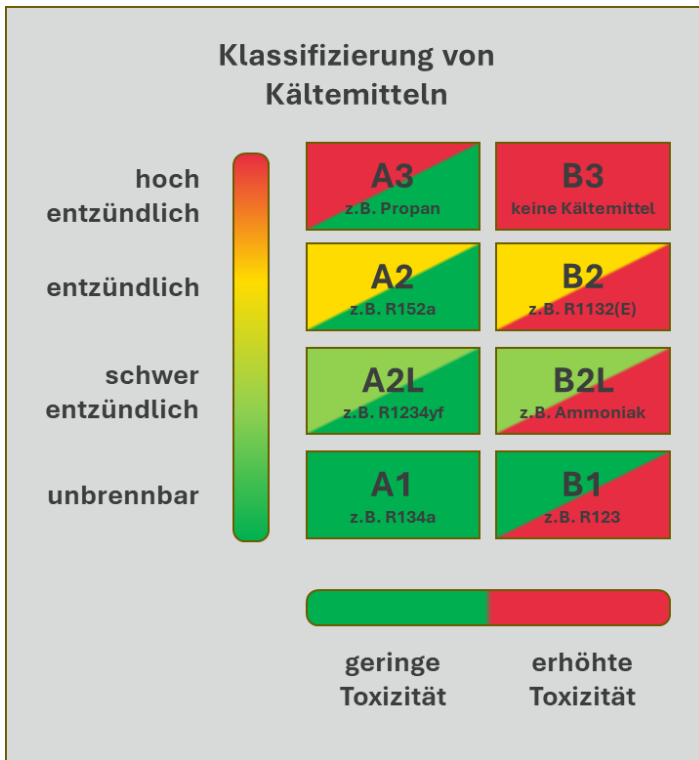
Das Kältemittel dient der Wärmeübertragung und dem Phasenwechsel im Kältekreis der WP (siehe Abschnitt 5.1). Je nach Quell- und Senkentemperatur, Einbauort, Kältemittelmenge, und gesetzlicher

Bestimmungen gibt es unterschiedliche Anforderungen an das Kältemittel. Verschiedene Parameter haben dabei Relevanz:

- Temperatur Wärmequelle,
- Temperatur Wärmesenke,
- Energieeffizienz,
- Chemische Stabilität,
- Thermische Stabilität,
- Drucklage,
- GWP - Global Warming Potenzial (Treibhauspotenzial),
- ODP - Ozone Depletion Potenzial (Ozonabbaupotenzial),
- TEWI - Total Equivalent Warming Impact,
- Brennbarkeit,
- Toxizität: leibesfruchtschädigend, krebserregend, mutagen,
- Menge des Kältemittels,
- Verfügbarkeit Schmiermittel.

5.1.3.1 Klassifizierung

Die Klassifizierung von Kältemitteln anhand Brennbarkeit und Toxizität hat Relevanz auf deren Einsetzbarkeit bzw. entstehende bauliche Anforderungen, wie u.a. die Installation von Explosionsschutzmaßnahmen und automatisch betriebenen Lüftungsanlagen. In der Abbildung 38 ist die Klassifizierung in Anlehnung an ISO 817 dargestellt.



Quelle: nach COLD.WORLD, 2024

Abbildung 38: Klassifizierung von Kältemitteln in Anlehnung an ISO 817

5.1.3.2 Global Warming Potential

Das Global Warming Potential (GWP) gibt Aussage darüber, inwiefern Fluide die Fähigkeit haben, zur Erderwärmung beitragen zu können, in Referenz zu Kohlenstoffdioxid. Umso kleiner der Wert, desto kleiner ist die Schädlichkeit. In verschiedenen Förderprogrammen werden Anforderungen an die Höhe des GWP gestellt. Beispielsweise muss im Rahmen der BEW-Förderung begründet werden, wenn der Einsatz von Kältemitteln mit einem GWP > 400 gewählt wird. Des Weiteren gilt ab 01.01.2020 ein Verbot für das Inverkehrbringen von ortsfester WP, die Kältemittel mit einem GWP ≥ 2500 nutzen (mit Ausnahmen) (BFS, 2024). Zu berücksichtigen ist, dass Kältemittel mit einem niedrigen GWP oft eine gute Brennbarkeit aufweisen.

5.1.4 Betriebsweise

Für die Betriebsweisen der WP allein, oder im Verbund mit anderen Erzeugern stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, die die Effizienz der Wärmeerzeuger beeinflussen. Je nach Jahreszeit bzw. Außentemperatur oder Quelltemperatur ergibt sich die effizienteste Betriebsweise. Die Betriebsstunden der WP sind dabei so einzustellen, dass die gewünschte Wärmemenge (z.B. 65%) im Jahresverlauf erreicht wird.

Im Folgenden werden anhand der Jahresdauerlinie (Abbildung 39 bis Abbildung 42) die unterschiedlichen Betriebsweisen von WP erläutert. In der grafischen Darstellung sind die Heizleistung in Prozent

und die Außentemperatur in °C in Abhängigkeit von der Zeit, die in Stunden im Jahr angegeben ist, dargestellt. Aus der Achsenbeziehung ist ablesbar, dass im Winter (Außentemperatur -15 bis 0°C) die Heizleistung zwischen 60 % und 100 % liegt. Im Herbst und Frühling, wenn die Außentemperatur generell über 0 °C liegt, beträgt die Heizleistung zwischen 30 % und 60 %. Schließlich wird oberhalb einer Außentemperatur von 10°C eine Heizleistung von weniger als 30 % benötigt.

Die Jahresdauerlinie bildet ab, für wie viele Stunden im Jahr die jeweilige Heizleistung erforderlich ist. Die Jahresdauerlinie wird erstellt, in dem die Leistungswerte je Zeiteinheit eines Jahreslastganges nach ihrer Größe sortiert werden. Jedem Leistungswert bleibt dabei eine Zeiteinheit in der Jahresdauerlinie zugeordnet. Häufig vertretene Werte reihen sich nebeneinander entlang der x-Achse und zeigen sich optisch als "Plateau" (in der Abbildung 39 beispielhaft bei ca. 40 % Heizlast). Selten verzeichnete Leistungswerte nehmen weniger Zeiteinheiten und folglich weniger Breite auf der x-Achse in der Jahresdauerlinie ein. Dies ist beispielhaft bei sehr großen und sehr kleinen Heizleistungen ablesbar.

Die Fläche unterhalb der Jahresdauerlinie widerspiegelt, wie bei einem Jahreslastgang, die Arbeit des Wärmereizers, der die Wärme bereitstellt.

Monovalente Betriebsweise

Die monovalente Betriebsweise der WP führt im Jahresverlauf zur vollständigen Deckung des Wärmebedarfs. In der folgenden Abbildung 39 ist aus diesem Grund die Fläche unter der Jahresdauerlinie vollständig durch die WP gefüllt. Unabhängig von der Außentemperatur stellt diese die zu deckende Heizlast zur Verfügung. Eine Wärmequelle mit konstanter Quelltemperatur ist für diese Variante effizient.

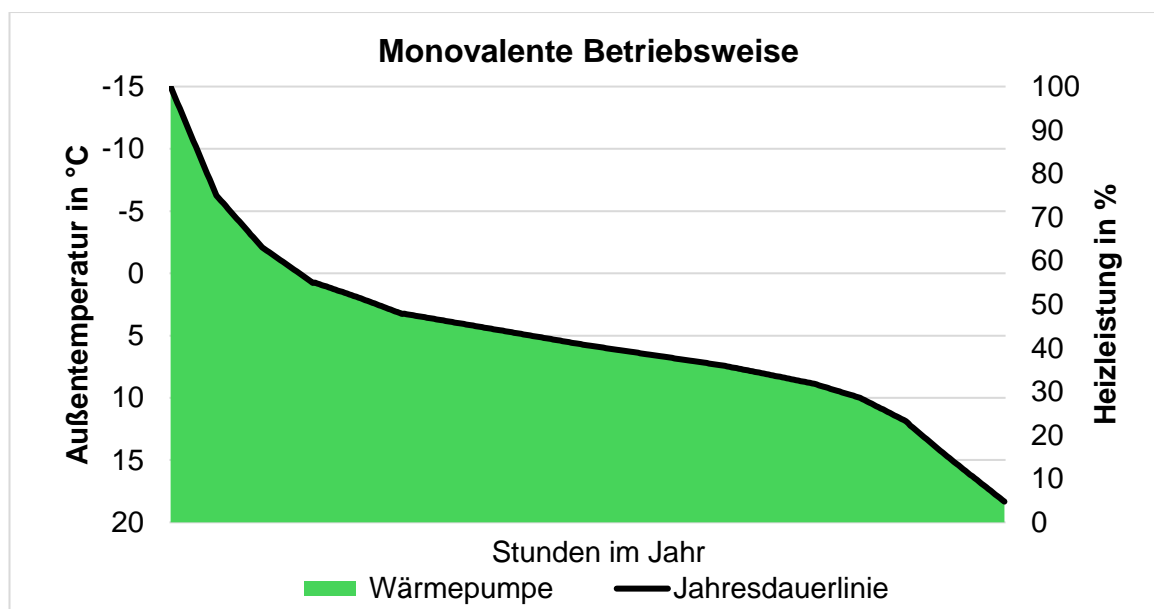


Abbildung 39: Jahresdauerlinie - monovalente Betriebsweise

Bivalent-alternative Betriebsweise

Die Wärmeversorgung kann bivalent-alternativ gedeckt werden, wenn mindestens zwei Wärmeerzeuger vorhanden sind. Dabei wird alternativ der eine oder andere Erzeuger genutzt. Die Umschaltung erfolgt am sogenannten Bivalenzpunkt, einem Umschaltunkt, auf den zweiten Wärmeerzeuger, sobald eine bestimmte Außentemperatur unterschritten (im Beispiel 3°C), bzw. eine Heizlast überschritten wird. Damit wird verhindert, dass die WP bei zu niedrigen Quelltemperaturen ineffizient arbeitet oder für hohe Heizlasten überdimensioniert werden muss. In Abbildung 40 ist beispielsweise eine Deckung von 60% des Wärmebedarfes mit der WP unter dieser Betriebsweise dargestellt. Diese Betriebsweise wird beim Einsatz von Luft-WP oft gewählt.

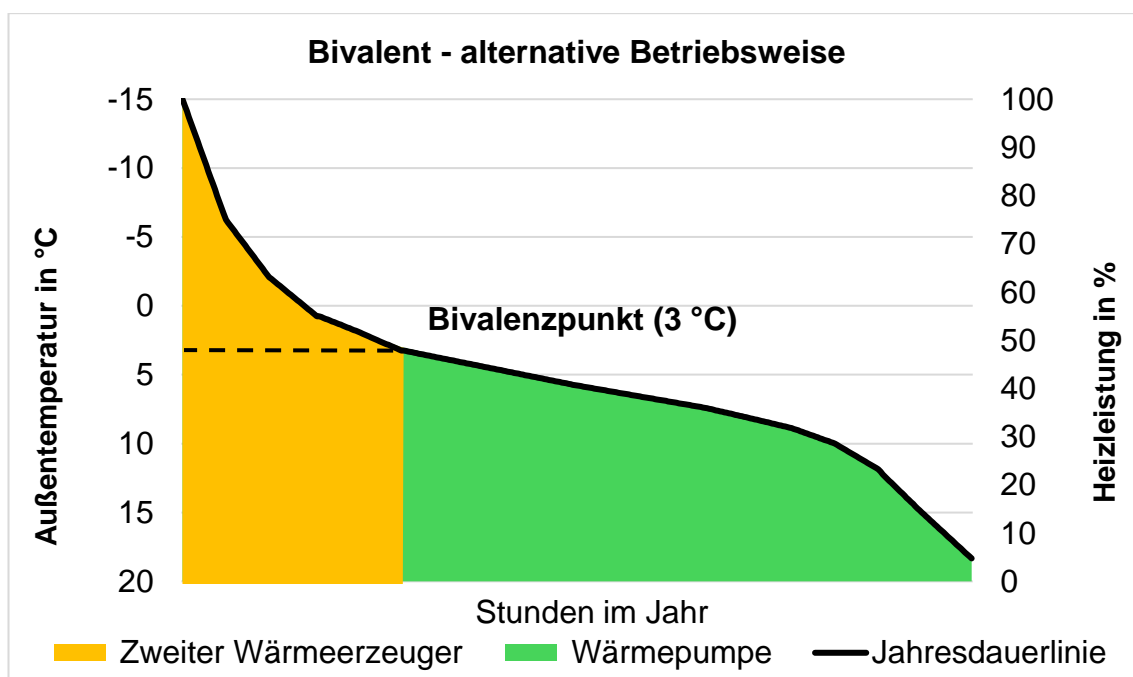


Abbildung 40: Jahresdauerlinie - bivalent-alternative Betriebsweise

Bivalent-teilparallele Betriebsweise

Mit der bivalent-teilparallelen Betriebsweise kann der Anteil der WP an der Wärmebereitstellung erhöht werden, indem sie auch "nach" dem Bivalenzpunkt bei tieferen Außentemperaturen betrieben wird. Die Leistung wird mit sinkender Außentemperatur, bzw. steigender Heizlast zurückgenommen und ab einem bestimmten Punkt (siehe Abbildung 41) abgeschaltet.

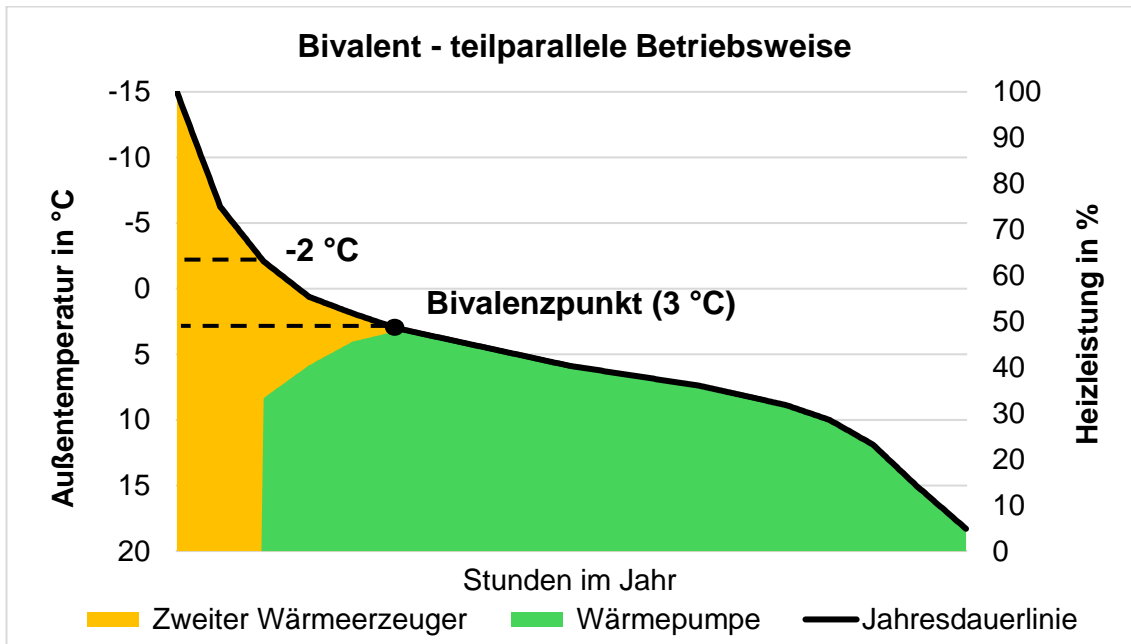


Abbildung 41: Jahresdauerlinie - bivalent-teilparallele Betriebsweise

Bivalent-parallele Betriebsweise

Die bivalent-parallele Betriebsweise dient dazu, dem Kompromiss zwischen Wärmepumpeneffizienz und maximalem EE-Anteil gerecht zu werden. Die WP wird das ganze Jahr, jedoch mit geringerer Leistung ab dem Bivalenzpunkt, betrieben. Im Beispiel der Abbildung 42 kann so ein Wärmepumpen-Anteil von 80 % erreicht werden.

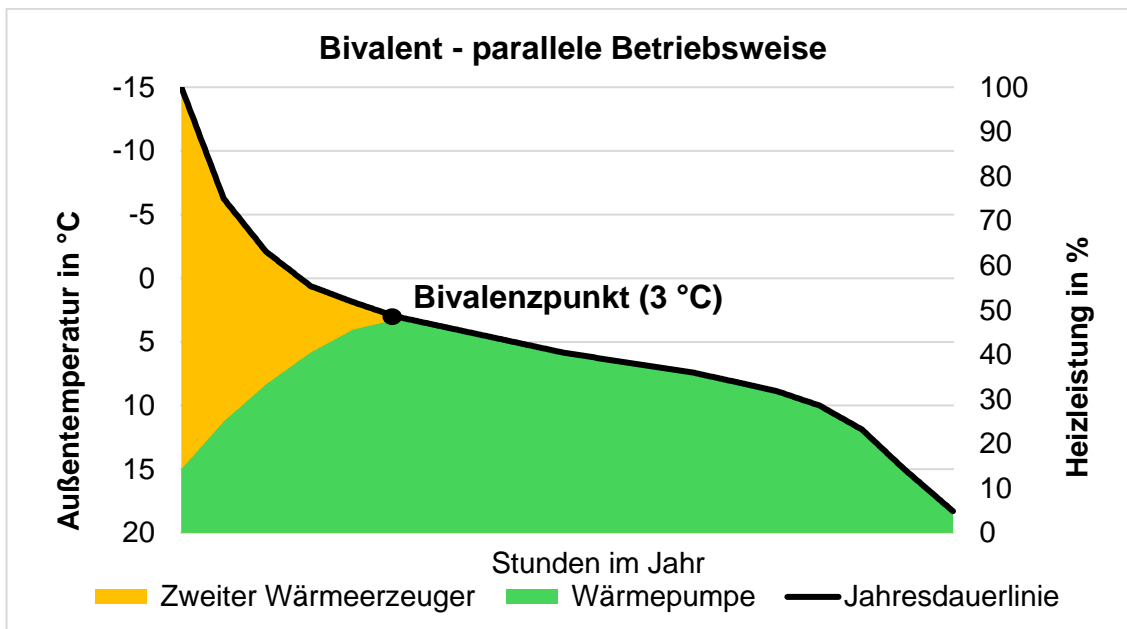


Abbildung 42: Jahresdauerlinie - parallele Betriebsweise

5.2 Wärmeverteilersysteme / Wärmenetze

Herzstück eines nutzerübergreifenden Quartierswärmekonzeptes ist das Wärmenetz. Der ausgewählte Netztyp beeinflusst die Wärmeverluste, die Investitionskosten und die Art der Übergabe der Wärme im Gebäude, sowie eventuelle Nacherhitzungen. In der Abbildung 43 sind verschiedene Netztypen zur Verteilung von WP-Wärme in einem Quartier schematisch dargestellt. Zur Erhöhung der Übersicht wurde in der Abbildung auf die Darstellung von Wärmespeichern, Ventilen und Regelorganen verzichtet. Des Weiteren sind keine Heizflächen und Anlagenkomponenten zur Warmwasserbereitung eingezeichnet (Arten der Warmwasserbereitung werden in Kapitel 5.3.3 separat erläutert). Die eingetragenen Fluidtemperaturen sind exemplarisch ausgewählt und sollen dem erleichterten Verständnis dienen. Es wurde dabei bei allen Varianten von gleichen Temperaturniveaus der Umweltwärmequellen ausgegangen.

Hochtemperaturnetz (HT-Netz)

Ein HT-Netz kann im Kontext von Wärmekonzepten auf WP-Basis als ein Netz bezeichnet werden, das Wärme mit einer Temperatur von mehr als 65 °C dem Kunden an der Schnittstelle zum Kunden-Gebäude übergeben wird. Der Kunde kann dann die Wärme zur Raumheizung und WWB ohne dezentrale Wärmeerzeuger einsetzen. HT-Netze, denen noch überwiegend durch Verbrennungsprozesse Wärme zugeführt wird, hatten in der Vergangenheit oft Temperaturen von 120 °C und mehr.

Die Wärme zur Quartiersversorgung wird zentral in einer Quartierszentrale erzeugt. Bei monovalenten HT-Netzen in der Regel durch kaskadierte WP. Die Quellen-Leitungen führen die Umweltwärme über eine gemeinsame Sammelleitung mit Temperaturen von ca. 0-15°C zur WP. Die Höhe der Temperatur ist dabei stark von der Art der Umweltwärmequelle abhängig. Als Wärmeträger wird Sole eingesetzt. Sole bezeichnet in diesem Zusammenhang ein frostschutzmittelhaltiges Wassergemisch. Zusätzlich zu einer WP-Anlage können weitere Wärmeerzeuger zur Spitzenlastdeckung eingesetzt werden, wie beispielsweise Power to Heat Anlagen oder Gas-Kessel.

Aufgrund der hohen VL- Temperatur, kann ein HT-Netz mit großen Spreizungen (Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf) betrieben werden. Typische Spreizungen liegen im Bereich von 20 bis 30 K. Nachteil einer hohen Systemtemperatur sind hohe Wärmeverluste. Bei unsanierten HT-Netzen erreichen die Wärmeverluste oft Werte von 15 bis 20 % der jährlich eingespeisten Wärmemenge

Niedertemperaturnetz (NT-Netz)

Die Prämisse bei einem NT-Netz besteht darin, mit der WP eine möglichst niedrige VL-Temperatur zu erzeugen, um die WP-Effizienz zu maximieren (siehe Kapitel 5.1.1). Ein NT-Netz stellt deswegen an der Schnittstelle zum Kunden-Gebäude Wärme mit Temperaturen von maximal ca. 38-55 °C bereit. Die Be-

reitstellungstemperatur wird so niedrig wie möglich gewählt, aber trotzdem hoch genug um die Heizlast der überwiegenden Gebäude im Quartier decken zu können. Für alle anderen Gebäude werden Sanierungsmaßnahmen erforderlich (beispielhaft, siehe Kapitel 9.1.3) um mit NT-Wärme die Heizlast decken zu können. Bei allen angeschlossenen Gebäuden, die Großanlagen zur WWB betreiben, wird ein dezentraler Wärme-Erzeuger zur Nacherhitzung benötigt, da mit einem NT-Netz keine Trinkwassertemperatur von 60 °C erzeugt werden kann. Erläuterungen dazu befinden sich im Kapitel 5.3.3.

Ähnlich wie beim HT-Netz wird in einer Quartierszentrale die Wärme erzeugt. Bei einem NT-Netz erfolgt dies jedoch in der Regel einstufig, das heißt, nicht durch in Reihe geschaltete WP (keine WP-Kaskade). Die Abbildung 43 zeigt für das NT-Netz ein beispielhaftes Temperaturszenario, welches für den Betrieb von EWS zur Wärmeversorgung von sanierten Altbauten erreicht werden kann. Da die Heizlast abhängig von der Außentemperatur ist, wird jedoch ein NT-Netz in der Regel nicht mit einer konstanten, sondern einer gleitenden VL-Temperatur betrieben, wodurch die Betriebstemperaturen von Frühjahr bis Herbst meist niedriger sind.

Die Betriebsweise mit niedrigen Temperaturen hat nicht nur Vorteile für die Effizienz der WP. Außerdem werden Wärmeverluste gegenüber einem HT-Netz reduziert. Je nach Kundendichte und Dämmstärke können Werte von weniger als 7 % im Jahr erreicht werden. Des Weiteren stehen bei der Wahl des Rohrmaterials mehr Möglichkeiten, insbesondere beim Einsatz von Kunststoffen, zur Wahl.

Aufgrund der niedrigeren VL-Temperaturen sinkt jedoch die mögliche Spreizung im Netz, da die RL-Temperaturen durch die Wärmeübergabesysteme begrenzt sind. Spreizungen von 10 bis maximal 20 °C werden bei NT-Netzen erreicht. Gegenüber HT-Netzen wird folglich ein größerer Rohrquerschnitt bei gleicher Wärmeleistung erforderlich.

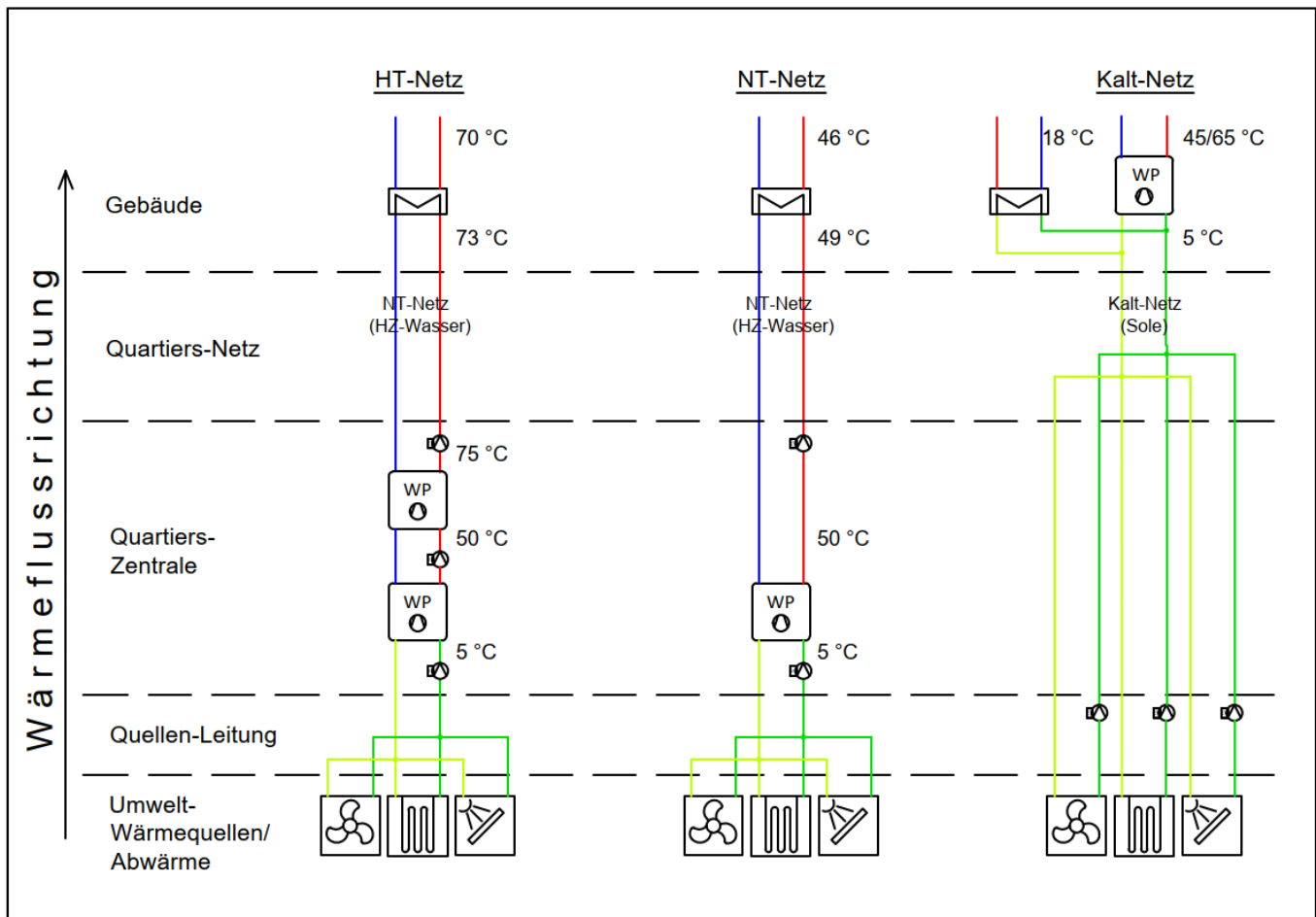


Abbildung 43: Netz-Typen zur Verteilung von WP-Wärme in Quartieren (Temperaturen beispielhaft)

Kalt-Netz

Kalt-Netze werden mit einer grundsätzlich anderen Strategie betrieben als HT- und NT-Netze. Es bestehen keine Quartierszentralen in denen WP betrieben werden, da der Temperaturhub zur erforderlichen Heiztemperatur erst im Gebäude des Kunden erfolgt. Sole-Leitungen führen von den Umweltwärmequellen/Abwärme direkt zum Kunden-Gebäude. Aufgrund einer Systemtemperatur nahe der Erdoberflächtemperatur (0-15 °C) bestehen die Rohrleitungen in der Regel aus unisolierten PE-Rohren. Mittels WP wird vor Ort die individuell erforderliche VL-Temperatur für Heizung (beispielsweise 45 °C) oder WWB (beispielsweise 65 °C) erzeugt. Die WP-Effizienz über alle Kunden kann dadurch erhöht werden. Sanierete Gebäude profitieren von besonders niedrigen Betriebskosten. Unsanierete Gebäude können auch mittels Kalt-Netz mit Wärme für die WP versorgt werden. Ein höherer Stromeinsatz wird jedoch für diese Gebäude erforderlich.

Im Sommer kann außerdem das Kalt-Netz zur "freien" Kühlung eingesetzt werden. Diese erfolgt ohne Einsatz kompressorbetriebener Kältetechnik (siehe Kapitel 5.1.2.4).

Ein besonderer Vorteil von Kalt-Netzen ist, dass auch an verteilten Standorten im Quartier Umweltwärmequellen direkt in das Kalt-Netz eingebunden werden können, da sie nicht sternförmig zu einer Quartierszentrale zusammengeführt werden müssen. Im Unterschied zu HT und NT-Netzen werden in diesem Fall nicht zwei separate Netze (eins der Umweltwärmequellen und eins der Heizungswärme) erforderlich. Eine sehr flexible Erschließung von Umweltwärmequellen wird dadurch möglich. Beispielsweise können Rückkühler und Solarthermieranlagen verteilt auf Dächern im Quartier in das Kalt-Netz eingebunden werden. Gleiches gilt auch für Abwärmequellen. Des Weiteren müssen EWS-Felder nicht zentral, sondern können auch an mehreren Standorten angelegt werden, wodurch ein höherer geothermischer Ertrag generiert werden kann.

Des Weiteren ist aufgrund der niedrigen Systemtemperatur das Potenzial zur Einbindung von Abwärme deutlich höher als bei anderen Netzen. Gebäudekühlung kann so auch als eine Form der Abwärme der Regeneration von EWS dienen.

Aufgrund der Systemtemperatur nahe der Erdreichtemperatur treten nahezu keine Wärmeverluste auf. Stattdessen können Wärmegewinne mit jedem Trassenmeter gewonnen werden. Wird ein Netz überdimensioniert, entstehen daher eher positive als negative Effekte in der Wärmebilanz. Da die Kosten für unisolierte PE-Rohre deutlich niedriger sind als für hochgedämmte Rohre, führt eine Überdimensionierung nur zu sehr gering steigenden Wärmegestehungskosten. Dies ist ein Vorteil bei der Erschließung von Quartieren, deren Wärmebedarf und Kältebedarf schwer prognostizierbar ist.

Die Spreizung eines Kalt-Netzes wird in der Regel auf sehr kleine Werte (ca. 4 K) ausgelegt, um ein Verreisen der Wärmequellen zu unterbinden. Folglich werden hohe Volumenströme und große Rohrquerschnitte erforderlich. Da der Wärmeträger im Netz Frostschutzmittel enthält, die in der Regel in die Wassergefährdungsstufe 1 (WGK 1) eingegliedert werden, kann es dazu kommen, dass zusätzliche behördliche Auflagen zum Betreiben eines Kalt-Netzes entstehen. Diese können u.a. die Installation eines Warnsystems bei Abfall des Systemdruckes, die Installation eines Leckageüberwachungssystems oder die Installation eines doppelwandigen Rohres beinhalten. Bei besonders hohen Quellentemperaturen kann im Einzelfall auf den Einsatz von Frostschutzmitteln verzichtet werden. Alternativ kann durch Einsatz einer "Booster-WP" die Systemtemperatur angehoben und auf den Einsatz eines Frostschutzmittels verzichtet werden.

Ein wesentlicher Nachteil eines Kalt-Netzes ist das Betreiben vieler einzelner WP-Anlagen, gegenüber dem Betreiben einer einzelnen WP-Anlage im Quartier, wie beispielsweise bei einem NT-Netz. Es steigen dadurch die Kosten für Installation und Wartung, da mehrere WP-Systeme (inkl. MSR-Technik und

Speicher) geplant, und instandgehalten werden müssen. Des Weiteren kann es im Bestandsbau umfangreiche Umbaumaßnahmen erfordern, um Aufstellflächen für WP und Pufferspeicheranlagen bereitstellen zu können.

Eine wirtschaftliche Lösung kann bei sehr hoher Bebauungsdichte oft darin bestehen, in einer übergeordneten Kalt-Netz-Struktur mehrere nah beieinanderliegende Gebäude bzw. Gebäudekomplexe mit sehr ähnlichen Temperaturanforderungen von einer WP-Zentrale aus zu beheizen und somit die Vorteile von NT- und Kalt-Netz miteinander zu kombinieren.

5.3 Anlagentechnik

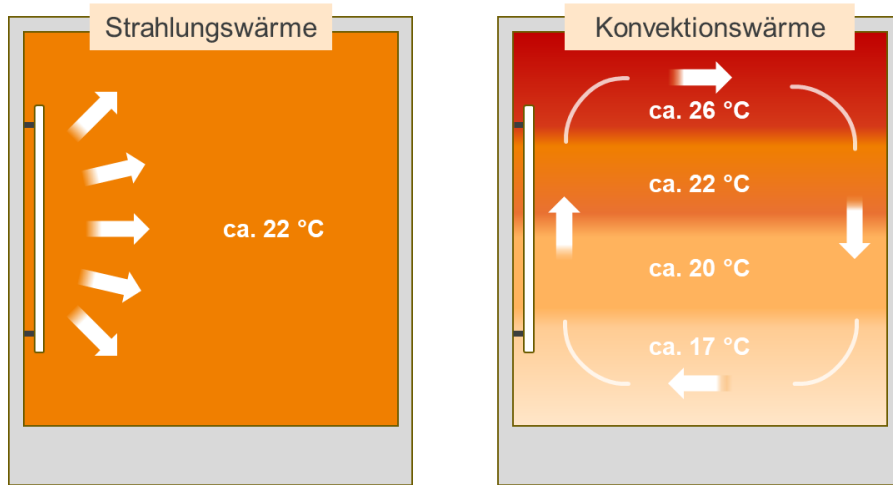
Die Bereitstellung der Wärme im Gebäude für die Heizung und Warmwasserbereitung kann mit unterschiedlichen wasserbasierten Systemen erfolgen. Für die Auswahl der Art und Dimension eines Systems sind die erforderlichen Vorlauftemperaturen ausschlaggebend. Das Verhältnis der Wärmemengen von Warmwasser und Heizung sowie die räumliche Ausdehnung der Verteilwege sind ebenfalls entscheidend für die Wahl des effizientesten Systems. Für verschiedene Erzeugersysteme, Arten der Speicherung und Warmwasserbereitung, sowie Wärmeübergabesysteme gibt es effiziente Kombinationsmöglichkeiten. Im Folgenden wird auf die verschiedenen Möglichkeiten eingegangen, welche die Vorlauftemperaturen und benötigten Wärmemengen senken können.

5.3.1 Arten der Wärmeübergabe

Die am Wärmeerzeuger bereitgestellte Wärme kann mit Hilfe drei verschiedener Prinzipien in den Raum übergeben werden:

- Strömung / Konvektion,
- Strahlung / Radiation,
- Leitung / Konduktion.

Klassische Heizkörper, so wie sie überwiegend in Bestandsgebäuden vorzufinden sind, beruhen überwiegend auf dem Prozess der Konvektion. Das Wärmeträgermedium (Heizwasser) gibt seine Wärme an das Strömende Medium Raumluft ab, welches im Kreis zirkuliert und die Wärme an Personen und Gegenstände im Raum abgibt. In Abbildung 44 ist dargestellt, dass sich durch die Konvektion eine Schichtung im Raum einstellt, die ein Temperaturgefälle erzeugt.



Quelle: nach HEIZPARER, 2024

Abbildung 44: Prinzipien der Wärmeübergabe

Die Wärmeübergabe einer Flächenheizung wie z.B. eine Decken-, Wand-, oder Fußbodenheizung beruht überwiegend auf dem Prinzip der Wärmestrahlung. Im Vergleich zur Konvektion wird hier nicht die Luft erwärmt um den Raum zu erwärmen. Die Wärmestrahlung erreicht Gegenstände und Personen im Raum direkt und erwärmt diese. Aus diesem Grund wird, auch bei geringerer Übertemperatur der Luft (siehe Abbildung 44, 22°C), ein Behaglichkeitsgefühl erzeugt. Die Raumluft muss weniger erwärmt werden und die Wärmeverluste über die Gebäudehülle und die Lüftung sinken. Zusätzlich werden die Wärmeverluste der Zirkulation der Luft entlang der Außenwände verringert. Die Strahlungs-Heizungskörper können mit geringerer Vorlauftemperatur betrieben werden und können die Staubaufwirbelungen verringern und trocknen die Luft (relative Luftfeuchte) nicht so stark aus. Flächenheizsysteme bieten zudem eine größere thermische Trägheit, was der Effizienz und Haltbarkeit der WP positiv beeinflusst.

Neben den genannten Systemen gibt es Heizkörper, die überwiegend nach dem Strahlungs-Prinzip arbeiten und zusätzlich kleine Lüfter installiert sind, die mit Konvektion unterstützen, wenn die Raumheizlast nicht gedeckt werden kann.

Mit einigen Flächenheizungssystemen kann auch eine Temperierung (Kühlung) erreicht werden, wenn diese mit kälterem Medium durchströmt werden. Hier ist die Entstehung von Kondensat im Taupunkt zu beachten. Die aus dem Raum entnommene Wärme kann z.B. auch für die Regeneration Erdwärmesonden genutzt werden (siehe Kapitel 5.1.2.4).

Die Konduktion der Wärme nimmt in Heizungssystem selbst eine wichtige Rolle ein. Nämlich während der Wärmeleitung durch das Metall des Heizkörpers oder durch den Estrich einer Fußbodenheizung. Nach dem Wärmeübergang an die Luft nimmt sie hingegen eine untergeordnete Rolle ein.

5.3.2 Heizkörperdimensionierung

Heizkörper dienen der Bereitstellung von Wärme in Räumen, in dem sie eine Heizleistung in die Umgebung abgeben.

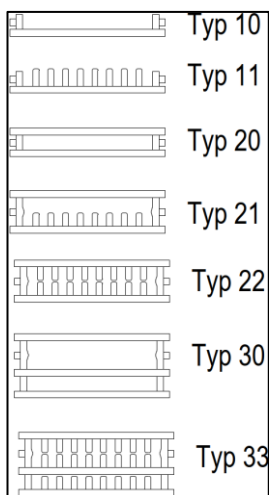
Die erforderliche Heizleistung, um die gewünschte Soll-Innentemperatur eines Raumes herzustellen, wird Heizlast genannt. Sie wird gemäß DIN 12831 für den Zeitpunkt der Normaußentemperatur berechnet. Die Normaußentemperatur beschreibt dabei die niedrigste Zweitagesmitteltemperatur, die in einem Zeitraum von 20 Jahren zehnmal erreicht oder unterschritten wurde.

Die Heizlast setzt sich zusammen aus den Wärmeleistungen, die der Raum an die kältere Umgebung abgibt. Zu ihnen zählen Transmissionswärmeverluste, Lüftungswärmeverluste und gegebenenfalls zusätzliche Aufheizleistung durch unterbrochenes Heizen.

Der Plattenheizkörper ist im Bestandsbau einer der häufigsten Arten von Heizkörpern. Die Heizleistung eines Heizkörpers ist im Wesentlichen bestimmt durch folgende Parameter:

- Fläche,
- Bauform,
- Heizkörperübertemperatur.

Die Fläche des Heizkörpers wird bestimmt durch Höhe und Breite. Die Bauform ist definiert durch die Anzahl von Platten (Index 1) und die Anzahl von Wärmeleitblechen (Index 2), die zur Vergrößerung der Oberfläche zwischen die Platten montiert sind.



Quelle: nach BUDERUS, 2023

Abbildung 45: Plattenheizkörper: Bauformen

Die Heizkörperübertemperatur ist die Differenz aus Heizkörpermitteltemperatur und der Raumtemperatur. Umso wärmer der Heizkörper gegenüber seiner Umgebung ist, desto mehr Wärme kann er mittels Wärmestrahlung und Wärmekonvektion an seine Umgebung abgeben (siehe Kapitel 5.3.1). Die Heizkörperübertemperatur wird berechnet aus der Heizungs-Vorlauf-Temperatur (H-VL), der Fluidtemperatur am Eintritt des Heizkörpers und der Heizungs-Rücklauf-Temperatur (H-RL), der Fluidtemperatur am Austritt des Heizkörpers. Standardmäßig wurden in der Vergangenheit, bei Heizungssystemen, denen überwiegend durch Verbrennungsprozesse Wärme zugeführt wurde, Heizkörper unter Annahme einer H-VL von 75 °C und einer H-RL von 65 °C ausgelegt (75/65). Die Differenz aus H-VL und H-RL wird als Spreizung bezeichnet. Sinken H-RL oder H-VL, so sinkt die Heizkörperübertemperatur und die abgegebene Wärmeleistung des Heizkörpers. In der beispielhaften Auflistung aus einem Datenblatt in Tabelle 11 ist die Abhängigkeit der abgegebenen Leistung eines Heizkörpers von Fläche, Bauform und Temperaturniveau ablesbar. In den Beispieldaten ist ablesbar, dass ein Heizkörper gleicher Bauform und Fläche bei konstanter Raumtemperatur (20 °C) einen Leistungsabfall von ca. 45 % bei einer Reduzierung der H-VL/H-RL von 75/65 auf 55/45 hat. Des Weiteren kann formuliert werden, dass ein Heizkörper der Bauform 33 ca. 40-50 % mehr Leistung hat als ein Heizkörper mit der Bauform 22.

Nach einer raumweisen Heizlastberechnung, kann anhand von Heizkörperdatenblättern ein passender Heizkörper ausgewählt werden. Da die Fenster meist die kältesten Rauminnenoberflächen sind, entsteht durch herabsinkende kalte Luft eine sogenannte "Fallluftströmung" vor dem Fenster. Um einer Fallluftströmung entgegen zu wirken, werden Heizkörper direkt unter der Fensterbrüstung montiert. Baulich sind deswegen Heizkörper in der Regel durch die Brüstungshöhe begrenzt. Sind Heizkörpernischen in der Wand angelegt, können diese ebenfalls die Länge des Heizkörpers limitieren.

Tabelle 11: Beispieldatenblatt: Heizkörperleistung

Typ	Heizkörper- exponent n	Wärmeleis- tung bei 75/65/20 °C [W/m]	Wärmeleis- tung bei 70/55/20 °C [W/m]	Wärmeleis- tung bei 55/45/20 °C [W/m]	Anstrich- fläche [m ² /m]	Wasser- inhalt [l/m]
Höhe H: 300 mm						
10	1,32	280	225	142	0,65	2,1
11	1,25	538	439	285	1,19	2,1
20	1,28	514	416	267	1,32	4,2
21	1,27	724	588	379	1,87	4,2
22	1,29	956	775	495	2,43	4,2
30	1,26	778	633	409	1,99	6,1
33	1,29	1.414	1.144	731	3,65	6,1
Höhe H: 600 mm						
10	1,31	488	394	250	1,29	3,5
11	1,27	928	754	485	4,14	3,5
20	1,26	884	720	465	2,63	7,1
21	1,28	1.250	1.014	650	5,5	7,1
22	1,3	1.646	1.331	848	8,37	7,1
30	1,3	1.340	1.082	689	3,97	11,4
33	1,31	2.372	1.913	1.214	12,58	11,4

Quelle: nach BUDERUS, 2023

5.3.3 Niedertemperaturtauglichkeit

Neben der Wärmemenge und der Wärmeleistung zählt die Heizungs-Vorlauftemperatur (H-VL) zu den wichtigen Betriebsparametern eines Heizungssystems. Im Kontext der Erstellung einer geothermischen Wärmeversorgung auf Wärmepumpenbasis nimmt die H-VL die wichtigste effizienzbestimmende Größe ein, da der Strombedarf der WP stark vom Temperaturhub der WP abhängt (siehe Kapitel 5.1.1). Im Umkehrschluss sinkt der mögliche Einsatz geothermischer Wärme mit steigender H-VL. Mit einer sinkenden H-VL sinkt jedoch auch die Wärmeleistung, welche von einem Heizkörper (siehe Kapitel 5.3.2), oder jeglichen anderen Heizsystem an die Umgebung abgegeben werden kann. Ein Kompromiss aus sinkender Wärmeabgabe bei steigender Effizienz der WP ist folglich zu finden. Der Begriff der "Niedertemperaturtauglichkeit" von Gebäuden und die Klassifizierung "NT-ready" haben sich aufgrund dessen in der Heizungstechnik etabliert. Welche H-VL erstrebenswert zum Betreiben einer WP ist, wird im Kontext von Neubau und Bestandsbau unterschiedlich bewertet, da mit dem Ziel die H-VL abzusenken erforderliche Maßnahmen einhergehen (Installation von Fußboden- Decken- oder Wandheizungssystemen, Vergrößerung von Heizkörpern, Heizungsstranganierung, Dämmung des Gebäudes).

Sind überwiegend Flächenheizungssysteme (Fußboden-, Wand-, oder Deckenheizungen) in Betrieb oder sehr groß dimensionierte Heizkörper und ist die Gebäudehülle gut gedämmt, können H-VL von 45 °C ganzjährig zur Deckung der Nutzeranforderungen genügen. Es liegt dann eine sehr gute Eignung für Niedertemperatursysteme und zur Nutzung von Geothermie vor. Im Rahmen der vorliegenden Studie werden diese Gebäude als Typ 1 definiert (Tabelle 12).

Im Bestandsbau führt der Kompromiss aus geringinvestiven Sanierungsmaßnahmen und einer H-VL-Absenkung meist zu deutlich höheren Temperaturen, die trotzdem als niedertemperaturtauglich eingestuft werden. In Anlehnung an Untersuchungen des Instituts für Energie- und Umweltforschung Heidelberg wird eine H-VL von 55 °C als sinnvoller Grenzwert der Niedertemperaturtauglichkeit erachtet (IFEU 2021). Im Rahmen der hier erarbeiteten Studie werden Gebäude mit maximaler H-VL von 55 °C als Typ 2 eingestuft und eine mittlere Eignung für Geothermie zugewiesen.

Gebäude, welche eine Vorlauftemperatur von mehr als 55 °C erfordern, werden als ungeeignet für Wärmepumpen und oberflächennahe Geothermie eingestuft (Gebäudetyp 3). Zu diesen Gebäuden zählen jene, deren Heizkörper klein dimensioniert sind, mittels Ein-Rohr-Heizungssystem beheizt werden, oder deren thermische Hülle sehr gering gedämmt ist. An diesen Gebäuden müssen Sanierungsmaßnahmen vollzogen werden, wie z. B. der Austausch von Heizkörpern oder der Umbau von Ein-Rohr- zu Zwei-Rohr-Heizungssystemen. Aus Praxis und Wissenschaft ist bekannt, dass der Austausch bereits weniger kritischer Heizkörper eine deutliche Absenkung der H-VL ermöglichen kann (siehe Abbildung 46). Die Umrüstung auf Heizkörper einer Bauform mit höherer Leistungsabgabe, bei gleicher Fläche ist in den meisten Fällen am einfachsten möglich (beispielsweise die Umrüstung von 22-er auf 33-er Heizkörper, siehe Kapitel 5.3.3).

Obligatorische Maßnahmen im Zuge der Gebäudeprüfung sind des Weiteren ein hydraulischer Abgleich, das Einstellen einer Außentemperaturgeführten Heizkurve und eine Regelungsprüfung.

Liegen keine Daten über die erforderliche H-VL vor, kann nur anhand von genauen Kenndaten der Wärmeübergabe im Gebäude (Parameter von Heizflächen oder Heizkörpern) und einer raumweisen Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 die erforderliche H-VL berechnet werden. Der Aufwand einer Heizlastberechnung und Heizflächenberechnung für die Erstellung einer Quartierswärmeversorgung ist hoch.

Alternativ wird empfohlen gebäudeweise eine experimentelle Absenkung der H-VL vorzunehmen und für eine repräsentative Heizperiode zu untersuchen, ob eine H-VL von 55 °C zur Deckung der Nutzerzufriedenheit ausreicht.

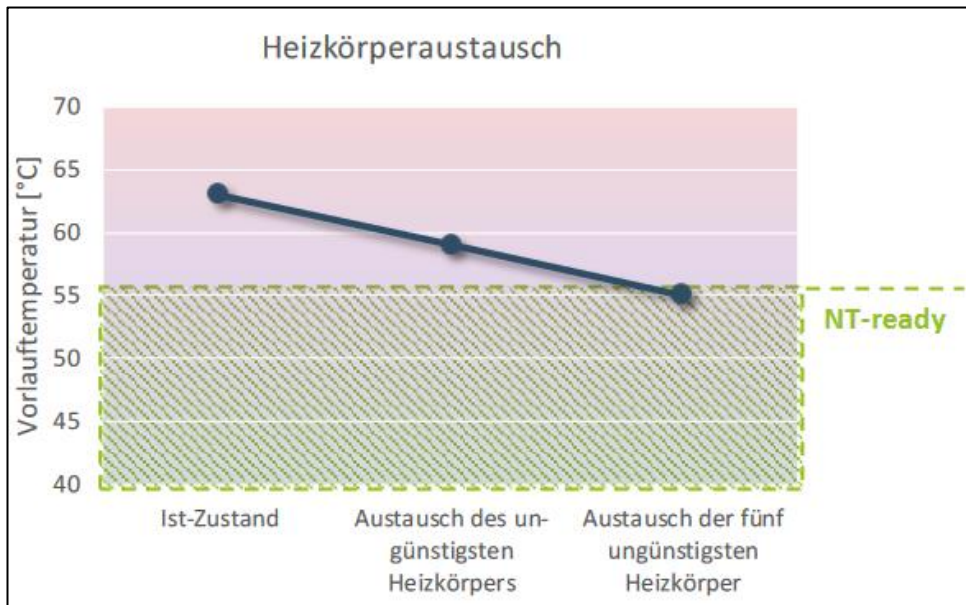
Ist eine empirische Ermittlung der H-VL nicht möglich, kann anhand der spezifischen Heizlast und der Art des Heizungssystems nur eine grobe Einschätzung der Niedertemperaturtauglichkeit vorgenommen werden (Daten-Güte 2), da Informationen über die Heizlast keine Informationen über vorhandene Heizkörper/ Heizflächen enthalten. Es kann lediglich vermutet werden, dass in einem Gebäude mit hoher spezifischer Heizlast es unwahrscheinlicher ist als in Gebäuden mit geringer spezifischer Heizlast, dass Bestands-Heizkörper/ Heizflächen für einen NT-Betrieb geeignet sind. Wird anhand des spezifischen Heizwärmebedarfes eine Abschätzung zur NT-Tauglichkeit vorgenommen, unterliegt diese einer noch höheren Unschärfe (Daten-Güte 3). Daten der Güte 2 und 3 dürfen lediglich zur ersten Abschätzung auf Quartiersebene eingesetzt werden und sind stark vom Gebäudotyp abhängig. Die in Tabelle 12, Zeile 4 und 5 dargestellten Werte sind für das im Bericht untersuchte Beispielgebiet "Bahnhofsvorstadt" exemplarisch angewendete und keine allgemeingültigen Werte.

Zu einer aussagekräftigen Bewertung der Niedertemperaturtauglichkeit sind immer empirische Daten einer experimentellen H-VL-Absenkung oder einer raumweisen Heizlastberechnung und Heizflächendimensionierung erforderlich. Des Weiteren sollte immer ein systemkundiger Heizungsplaner/ Heizungsbauer in die Bewertung der NT-Tauglichkeit einbezogen werden.

Zudem ist zu beachten, dass bei der Absenkung der H-VL in der Regel die Spreizung (Differenz zwischen H-VL und R-VL) sinkt. Infolgedessen müssen Heizkörper mit erhöhtem Volumenstrom betrieben werden, um die erforderliche Heizleistung bereit stellen zu können. Nach der Prüfung der Heizkörperdimensionierung sollte eine Prüfung der Heizungsstränge erfolgen, in der ermittelt wird, ob die erforderlichen Volumenströme durch das Bestandsleitungsnetz im Gebäude gefördert werden können, ohne dass ungewünschte Effekte entstehen, wie beispielsweise stark erhöhter Pumpenstrombedarf oder Strömungsgeräusche.

Tabelle 12: Clusterung der Gebäude anhand der Niedertemperaturtauglichkeit

Kenngroße	Daten-Güte	Gebäudotyp 1	Gebäudotyp 2	Gebäudotyp 3
Niedertemperaturtauglichkeit		hoch	mittel	ungeeignet
Heizungs-Vorlauf-temperatur	1	< 45 °C	< 55 °C	> 55 °C
Spezifische Heizlast	2	< 30 W/m ²	< 70 W/m ²	> 70 W/m
Spezifischer Heizwärmebedarf	3	< 40 kWh/(m ² a)	< 80 kWh/(m ² a)	> 80 kWh/(m ² a)
Heizungssystem	2	Flächenheizungen, Heizkörper (2R)	Flächenheizungen, Heizkörper (2R)	Heizkörper (1R) Heizkörper (2R)



Quelle: ifeu, 2021

Abbildung 46: Heizkörperaustausch und Auswirkungen auf die Niedertemperaturtauglichkeit eines Beispielgebäudes

5.3.4 Arten der Warmwasserbereitung

Die Anforderungen an die Warmwasserbereitung (WWB) sind komplex. Die Art der Wärmeerzeuger, das Wärmeübergabesystem, die Verteilung der Zapfstellen und die Systemtemperaturen sowie Speicheranordnung beeinflussen die Wahl des effizientesten Systems.

Grundlegend ist in die Einteilung von Großanlagen und Kleinanlagen zu unterscheiden. Großanlagen im Sinne der WWB sind gemäß DIN 1988-200 Systeme, deren Trinkwasserleitungen ein Volumen von mehr als 3 Liter vom Warmwasserbereiter bis zur Zapfstelle umfassen, oder einen Trinkwasserspeicher von mehr als 400 Liter beinhalten. Kleinanlagen hingegen liegen unterhalb der oben genannten Volumina für Trinkwasserrohrleitungen und Trinkwasserspeicher. Großanlagen unterliegen der Auflage 60 °C am Austritt des Warmwasserbereiters bereit stellen zu können, wodurch eine hohe Anforderung an den Temperaturhub der WP resultiert. Des Weiteren muss eine Trinkwarmwasser-Zirkulationsleitung installiert werden, die gewährleistet, dass das erwärmte Trinkwasser um maximal 5 K auskühlt.

Im Folgenden wird die WWB bei Großanlagen mittels WP erläutert.

Arten der Warmwasserbereitung mittels Wärmepumpen

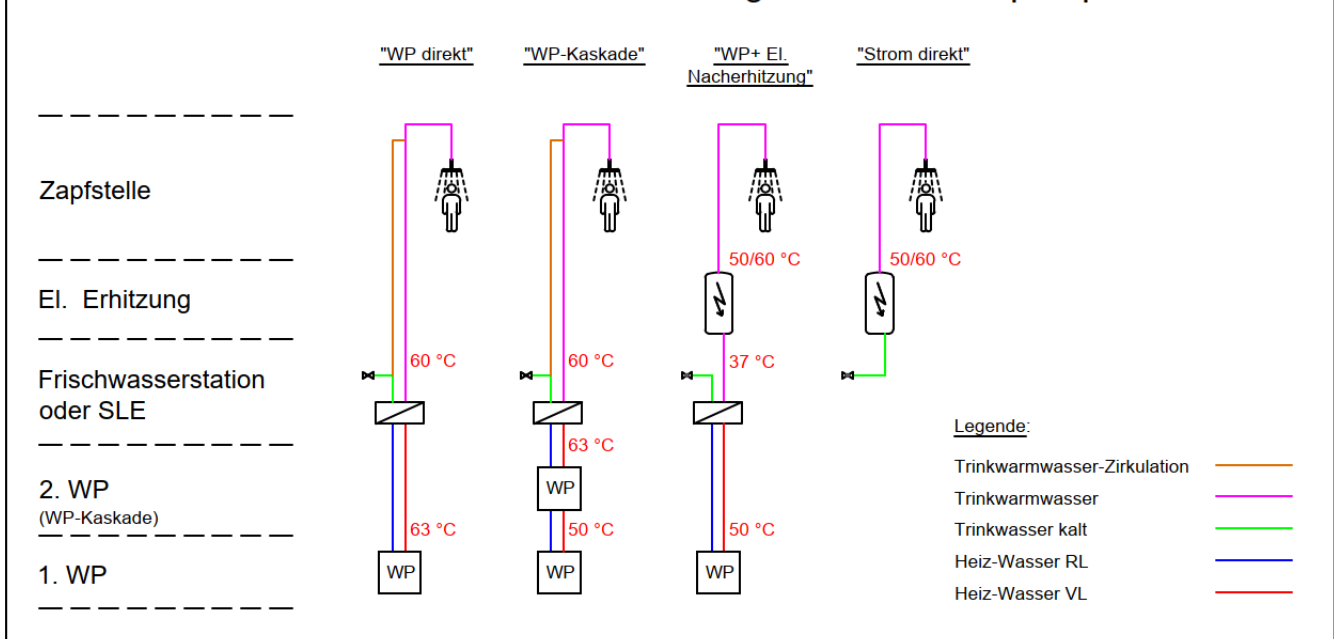


Abbildung 47: Arten der Warmwasserbereitung mittels Wärmepumpen

Die Abbildung 47 dient als eine vereinfachte schematische Darstellung zur Gegenüberstellung von vier verschiedenen Varianten. Zur Erhöhung der Übersicht wurde in der Abbildung auf die Darstellung von Wärmespeichern, Pumpen, Ventilen und Regelorganen verzichtet. Die eingeführten Temperaturen sind exemplarisch ausgewählt und sollen dem erleichterten Verständnis dienen.

Variante 1 („WP direkt“) bezeichnet die Warmwasserbereitung durch eine einzelne WP. Durch die WP wird das Heizungswasser im Vorlauf (rote Linie) auf ca. 63 °C erhitzt. Anschließend fließt das Wasser durch den Plattenwärmeübertrager zur Erhitzung des Trinkwassers. Physikalisch bedingt, kann im Plattenwärmeübertrager die Temperatur des Trinkwassers nicht ganz die Temperatur des Heizungswassers erreichen. Es stellt sich eine „Grädigkeit“ von ca. 3 K ein. Es kann in der Regel eine Trinkwassertemperatur von 63 °C bereitgestellt werden, wodurch die Vorgaben der Trinkwasserverordnung eingehalten werden.

Variante 2 (WP-Kaskade) bezeichnet die Trinkwassererwärmung durch eine WP-Kaskade. Zunächst wird das Heizungswasser durch die erste WP auf ein Niedertemperaturniveau (bspw. 40 °C) erwärmt, dann erwärmt die zweite WP (Reihenschaltung) das Heizungswasser auf 63 °C nach, um wie in Variante 1 eine Temperatur von 63 °C am Plattenwärmeübertrager bereitzustellen, sodass Trinkwarmwasser mit 60 °C erzeugt werden kann. Vorteil der kaskadierten Wärmebereitstellung ist, dass die erste WP kontinuierlich minimale Temperaturen, angepasst auf die Bereitstellung der Raumwärme, erzeugen kann und somit mit erhöhter Effizienz arbeitet. Die zweite WP kann flexibel entsprechend des Warmwasser-

bedarfs betrieben werden. Die Erzeugung hochtemperierter Wärme wird somit minimiert und die Effizienz des Gesamtsystems maximiert. Insbesondere bei Mehrfamilienhäusern ist die Variante 2 von Vorteil. Nachteil gegenüber Variante 1 ist ein erhöhter Investitions- und Platzbedarf im Kunden-Gebäude.

Variante 3 (WP + el. Nacherhitzung): Ähnlich wie in der Variante 2 erzeugt die erste WP ein Niedertemperaturniveau. Zur Gewährleistung einer Trinkwarmwassertemperatur von 60 °C erfolgt anschließend eine elektrische Nachheizung. Diese kann vor oder nach der Systemtrennung zwischen Heizungswasser und Trinkwasser erfolgen (dargestellt ist die trinkwasserseitige Nacherhitzung). Alternativ zu einer Erhitzung auf 60 °C kann bei Kleinanlagen auch auf eine niedrigere Soll-Trinkwassertemperatur (z.B. 50 °C) erhitzt werden.

Variante 4 (Strom direkt): Diese Variante der Warmwasserbereitung fällt in die Einordnung „Power-to-heat“. Es wird rein Strom eingesetzt, um Wasser zu erwärmen, wie bei der Verwendung eines Wasserkochers im Haushalt. Diese Art der Warmwassererwärmung eignet sich besonders für kleine Anlagen mit weiten Entfernungen zwischen den Warmwasserzapfstellen und der zentralen Wärmezeugung, sowie bei kleinem Warmwasserbedarf (beispielsweise nur zum Händewaschen).

In Kombination mit NT-Netzen (siehe Kapitel 775.2) kann der Einsatz von Variante 2 bis 4 eine gute Lösung darstellen. Die erste WP wird in dieser Anwendung in der Quartierszentrale auf NT-Niveau betrieben. Die Nacherhitzung zur WWB kann durch die zweite WP (Variante 2) oder elektrisch (Variante 3) erfolgen. Alternativ kann rein elektrisch die WWB erfolgen (Variante 4).

6 Berechnungsgrundlagen

6.1 Gebäudemodell

Für die energetische Bewertung und die Simulation von stündlichen Wärmebedarfen wurde ein Modell der Gebäude erstellt. Da die Nettoraumfläche bekannt ist, wird eine quadratische Grundfläche angenommen sowie eine Gebäude- und Geschosshöhe. Für das Bestandsgebäude werden U-Werte für die Bodenplatte, das Dach, die Fassade und für die Fenster angenommen. Die Fassade besteht zu 20 % aus Fenstern. Die Wärmeverluste der Simulation werden zu 15 % durch Lüftung und 85 % durch Transmission herbeigeführt.

Die Kenntnis von Gebäudehöhen und Fensterflächenanteil und U-Werten am Bestandsgebäude hat einen erheblichen Einfluss auf die Genauigkeit der Wärmeverlustberechnung und die darauf basierende Wirtschaftlichkeitsberechnung sowie auf die Wirtschaftlichkeit der Wärmeerzeugung.

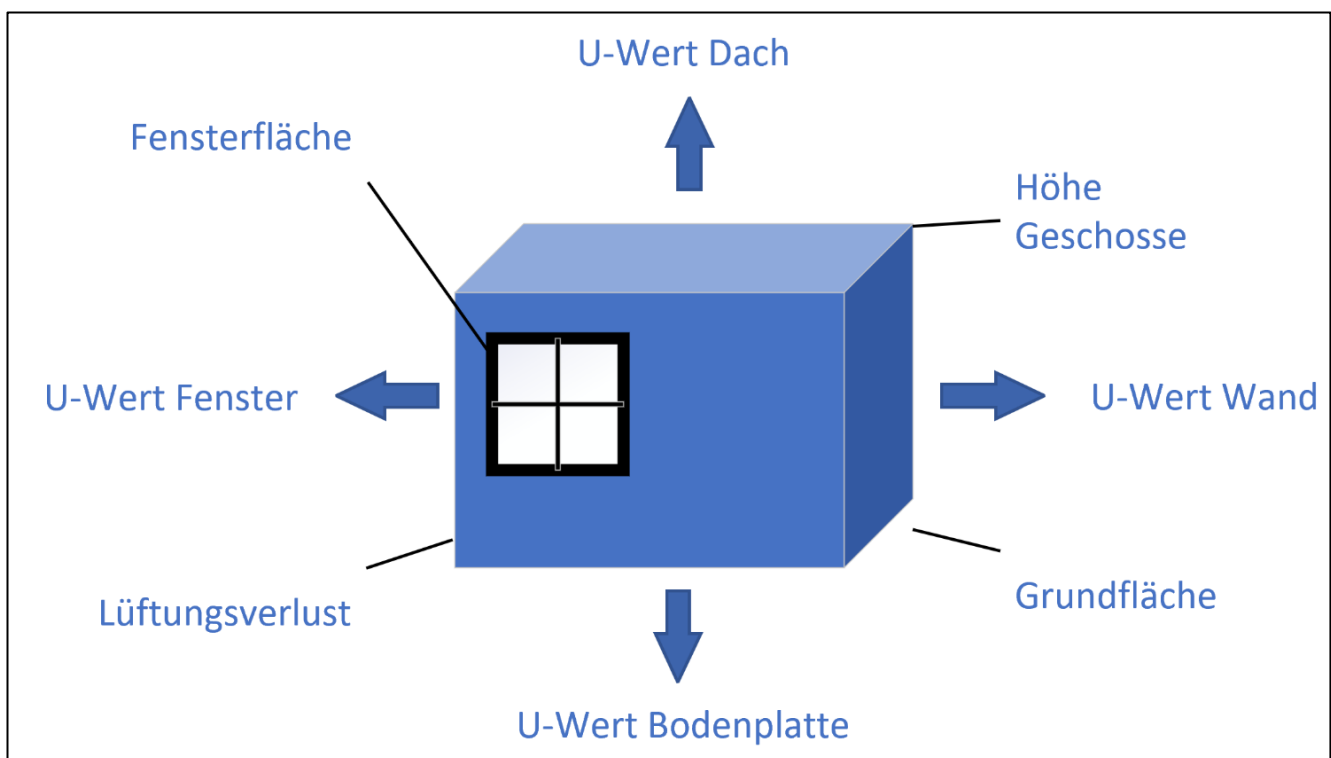


Abbildung 48: Gebäudemodell als Grundlage für die energetische Bewertung und Simulation (Gebäudehülle)

6.1.1 Lastkurven Gebäude

Die Erzeugung von Lastkurven für Gebäude und die Temperaturverläufe der Geothermie bedingen sich gegenseitig. Ein Abführen von thermischer Energie aus dem Erdboden führt zu dessen Auskühlung. Abgekühlter Erdboden kann, bei gleichen Fluidtemperaturen, nur eine geringere Wärmeleistung bereitstellen.

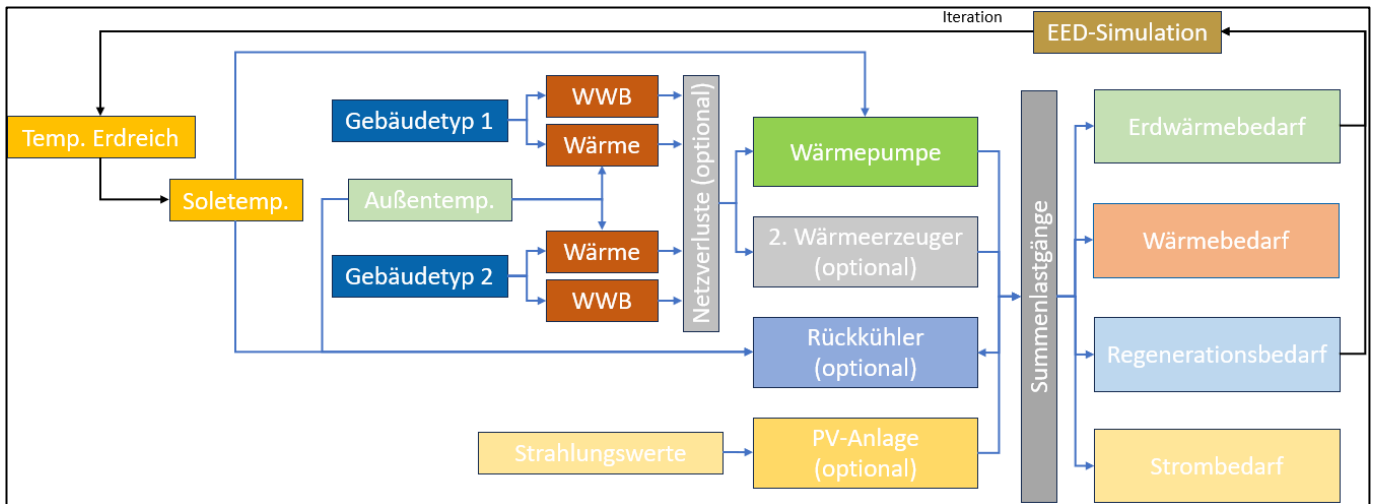


Abbildung 49: Schema der Lastgangiteration zur Approximierung der Untergrund- / Fluidtemperaturen

Die Näherung des Temperaturverlaufs der Fluidtemperatur (Soletemperatur) ist in Abbildung 49 dargestellt. Die Iterationsschleife beginnt mit der Erstellung der Gebäude-Heizlastgänge unter Berücksichtigung der Außentemperatur. Durch die Simulation der WP(n) ergibt sich ein quellseitiger Erdwärmebedarf und, je nach Konzept, auch ein Regenerationslastgang. Diese Werte stellen die Grundlage der EED-Simulation dar. Im Ergebnis der EED-Simulation werden Erdreichtemperaturen und die daraus resultierenden Fluidtemperaturen übergeben. Die Iterationsschleife kann erneut beginnen, bis die gewünschte Genauigkeit erreicht ist.

6.1.2 Technische Annahmen

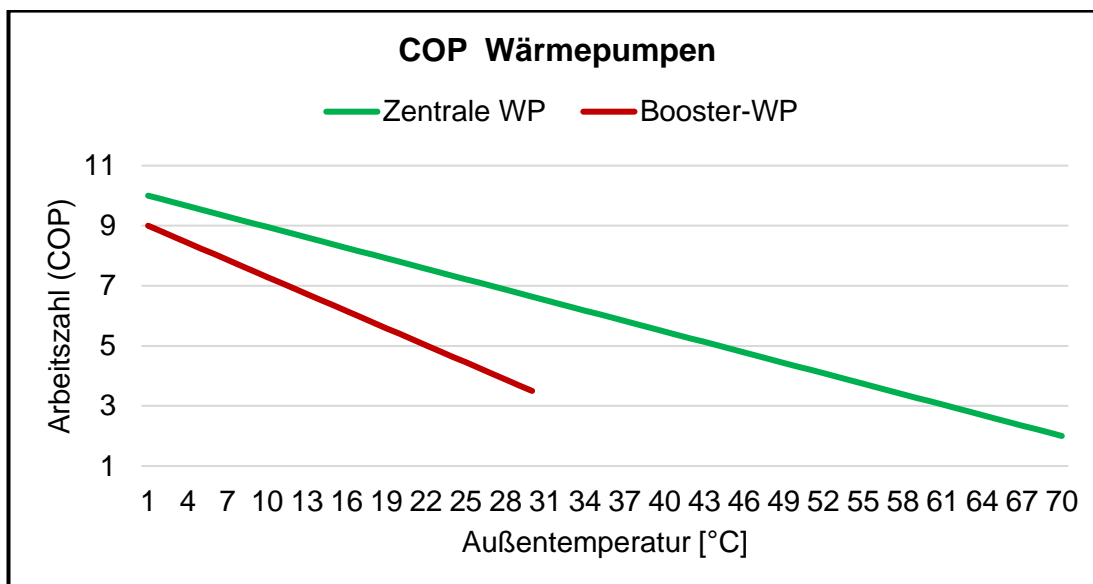


Abbildung 50: COP der simulierten Wärmepumpen in Abhängigkeit des Temperaturhubes

Nachdem die Wärmemengen und Soletemperaturen, z.B. durch eine EED-Simulation berechnet wurden, kann auch die WP genauer modelliert werden. Der COP kann dann in Abhängigkeit des gewünschten Temperaturhubes abgebildet werden (Abbildung 50). Der Temperaturhub ist hier die Differenz zwischen Heizungsvorlauf bzw. Netzvorlauf und der Soletemperatur. Diese Differenz schwankt im Jahresverlauf. Stehen Wärmebedarfe und Spitzenlasten, in bestimmten Grenzen, fest, kann die Kennlinie einer realen Maschine hinterlegt werden.

6.1.3 Wetterdaten

Zur Detaillierung der Lastgänge werden stündliche Wetterdaten hinzugezogen (Abbildung 51).

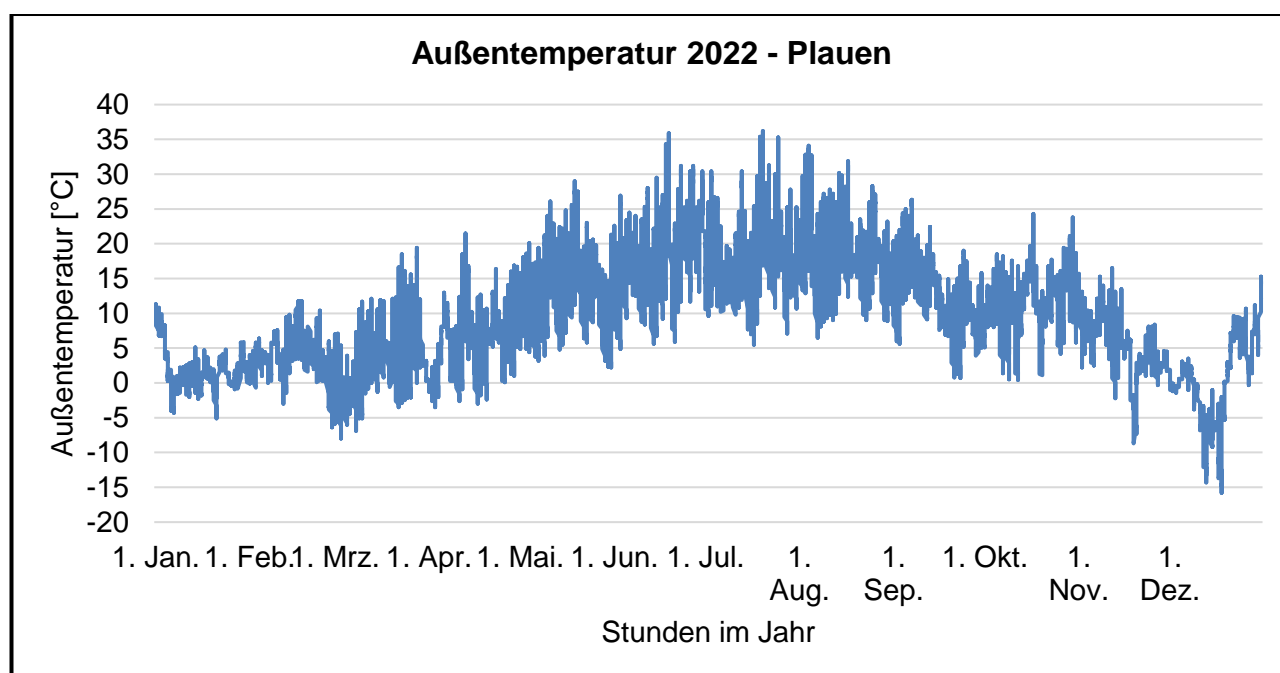


Abbildung 51: Außentemperaturverlauf Plauen im Jahr 2022

Der Außentemperaturverlauf in stündlicher Auflösung bietet eine Grundlage zur Simulation des Wärmebedarfs der Gebäude. Das Jahr 2022 mit einem Klimakorrekturefaktor von 1,04, für den Zeitraum vom 01.01.2022 bis zum 31.12.2022 und einer Minimaltemperatur von -15,8 °C. Da für das Jahr 2022 der Klimafaktor gering ist und zusätzlich Verbrauchsmesswerte vorliegen genügt der Temperaturverlauf zur weiteren Simulation der Gebäude bezüglich Jahreswärmemenge und Heizlast.

Bodentemperaturen

Da die Gebäude mit ihrer Grundplatte nicht die Außenluft berühren und Bodenkontakt haben, wird für den Wärmeübergang eine Abhängigkeit der Untergrundtemperatur im Jahresverlauf angenommen (Abbildung 52).

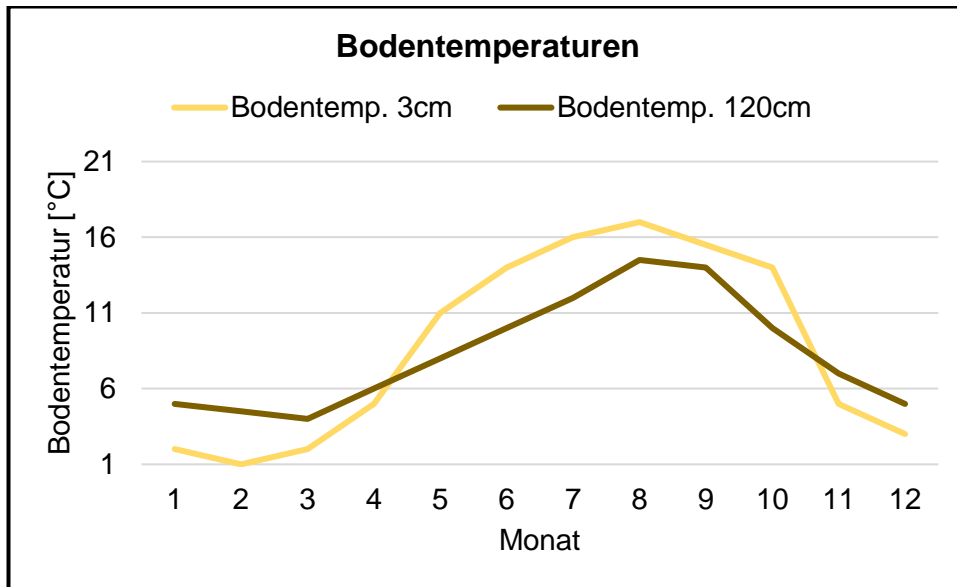


Abbildung 52: Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefen und Monaten

6.1.4 Wirtschaftliche Annahmen

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung der Wärmeversorgung wird mit einer dynamischen Investitionsrechnung nach der Kapitalwertmethode erfolgen. Cashflows der Zukunft werden dafür abgezinst. Für diese Wirtschaftlichkeitsberechnungen der Untersuchungsgebiete wurden folgende Annahmen getroffen.

Tabelle 13: Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Einflussfaktor	Einheit
Betrachtungszeitraum	20 Jahre
Zinsen (WACC)	6,5 %
Preisentwicklung Strom	2 %
Preisentwicklung Fernwärme	2 %
Preisentwicklung Instandhaltung / Wartung / Inspektion	2 %
Strom Mischpreis	0,24 €/kWh
Fernwärme Mischpreis (2025)	0,12 €/kWh
Erdgas Mischpreis (nur Rückert-Campus)	0,12 €/kWh
EE-Anteil Fernwärme**	0,30

* alle Preise netto, ** gem. Anforderung Wärmenetze 2030

Die Annahmen werden auf alle Untersuchungsgebiete angewendet. Für den Rückert Campus wurde zusätzlich ein Gaspreis von 0,12 €/kWh, mit der gleichen Preisentwicklung angenommen.

Der festgelegte Zinssatz von 6,5 % stellt die Weighted Average Cost of Capital (WACC) dar. Zukünftige Cashflows werden auf den Investitionszeitpunkt abgezinst. Das gewählte Verhältnis von Zinssatz zu Preisentwicklungen (6,5 zu 2) führt dazu, dass die zukünftigen Betriebskosten und Einnahmen durch Einspeisevergütungen mit jedem Jahr sinken.

7 Fördermöglichkeiten

Im Jahr 2024 existieren in Deutschland mehrere attraktive Fördermöglichkeiten für Erdwärmesondenanlagen und Wärmepumpen für Wohngebäude, Nicht-Wohngebäude und Wärmenetze, die darauf abzielen, die Energieeffizienz zu verbessern und den Einsatz erneuerbarer Energien zu fördern. Die zentralen Anlaufstellen für Förderungen sind die KfW und die BAFA (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle). Die Anforderungen und Beträge der Förderungen unterliegen ständigen Anpassungen. Zum Zeitpunkt der Erstellung (10/2024) waren die hier aufgeführten Förderungen aktuell. Es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit der Daten.

Gebäude

Für Wohngebäude bietet die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) eine Basisförderung von 30 % Zuschuss für den Heizungstausch auf eine förderfähige WP. Zusätzlich gibt es einen Klima-Geschwindigkeits-Bonus von 20 %, wenn die WP eine mindestens 20 Jahre alte Heizung ersetzt. Haushalte mit einem zu versteuernden Jahreseinkommen von maximal 40.000 Euro können einen einkommensabhängigen Bonus von 30 % erhalten. Ein Effizienzbonus von 5 % wird für besonders klimafreundliche Kältemittel oder effiziente Wärmequellen wie Geothermie gewährt. Für Nicht-Wohngebäude gibt es ebenfalls die BEG, die Zuschüsse und Kredite für die energetische Sanierung und den Neubau bietet. Hier werden Maßnahmen wie die Verbesserung der Gebäudehülle, der Anlagentechnik und der Beleuchtung gefördert. Die BMWK-Förderung bietet ebenfalls Zuschüsse für den Heizungstausch, wie zum Beispiel für Wärmepumpen und solarthermische Anlagen, die bei der KfW beantragt werden können. Effizienz-Einzelmaßnahmen wie die Dämmung der Gebäudehülle oder die Heizungsoptimierung werden ebenfalls gefördert. Je nach erreichtem Gebäudestandard werden bis zu 20 % der anrechenbaren Kosten der Sanierungsmaßnahmen und 50 % der energetischen Fachplanung in Form eines Tilgungszuschusses gefördert. Diese Förderprogramme bieten eine hervorragende Möglichkeit, die Investitionskosten zu senken und gleichzeitig einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Die spezifischen Anforderungen und Bedingungen der einzelnen Programme können gegebenenfalls auch kombiniert werden. Für das Jahr 2025 sind weiterhin Förderungen für Erdwärmesondenanlagen und Wärmepumpen geplant, die an die bestehenden Programme anknüpfen. So wird die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) voraussichtlich fortgesetzt.

Wärmenetze

Für Wärmenetze gibt es Förderprogramme, die den Ausbau und die Modernisierung unterstützen. Dazu gehören Zuschüsse für den Anschluss von Gebäuden an bestehende Wärmenetze sowie die Förderung der Errichtung, des Umbaus und der Erweiterung von Wärmenetzen, einschließlich der Integration erneuerbarer Energien. Auch die Errichtung und der Ausbau von Gebäudenetzen, die mehrere Gebäude mit Wärme versorgen, werden unterstützt.

Die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) ist eines der nachgefragtesten Förderprogramme des BAFA und wird im Folgenden erläutert. Die Förderung kann für den Neubau oder die Erweiterung/ Umbau (Transformation) eines Wärmenetzes erfolgen, mit dem Ziel einen möglichst hohen erneuerbaren Wärmeanteil (EE-Anteil) im Wärmesektor zu realisieren. Für den Neubau eines Wärmenetzes beträgt der zu erreichende Mindest-EE-Anteil 75 %. Im Rahmen des Modul 1 des BEW kann die Planung eines Wärmenetzes in Form einer Machbarkeitsstudie/ eines Transformationsplans gefördert werden, welche meist die Voraussetzung für andere Module des BEW sind.

Im Rahmen des Modul 2 des BEW werden Investive Maßnahmen für ein Gesamtvorhaben bis zu einem Anteil von 40 % gefördert, jedoch maximal in Höhe der Wirtschaftlichkeitslücke.

Im Rahmen des Modul 3 des BEW werden Einzelmaßnahmen an Wärmenetzen gefördert (z.B. der Einbau eines erneuerbaren Wärmeerzeugers, ohne Netzausbau).

Im Rahmen des Modul 4 des BEW werden Betriebskosten von Solarthermieanlagen und Wärmepumpen für die ersten zehn Betriebsjahre gefördert. Abhängig ist die Höhe der Betriebskostenförderung einer Wärmepumpe vom SCOP.

8 Geothermische Machbarkeitsstudie Beispielquartier Rückert Campus

8.1 Gebäudeanalyse

Die Gebäudeanalyse dient der Darstellung des aktuellen Gebäudezustandes bezogen auf den Sanierungsgrad und die Energieverbräuche. Mit Hilfe dieser Werte kann im Folgenden ein Gebäudemodell erstellt werden und eine Simulation der Bedarfe, der Wärmeerzeuger und der Photovoltaikanlage auf stündlicher Basis erfolgen.

8.1.1 Datengrundlage

Erdgasverbräuche

Der Erdgasverbrauch am Rückert-Campus kann, mittels elektronischer Zählerauslesung, als Monatssumme bereitgestellt werden (Abbildung 53). Die Daten können, wie in der Abbildung gezeigt, im INM Management grafisch ausgegeben werden. Sie dienen als Grundlage zur Verifizierung der erzeugten Lastgänge mittels Wetterdaten.



Abbildung 53: Gasverbräuche der Rückert Schule (Screenshot INM Management)

Das INM Management Tool, kann Monatssummen der Gasverbräuche bereitstellen. Diese Auflösung genügt der Erzeugersimulation nicht. Es werden Stundenlastgänge generiert, wobei die Monatssummen zur Verifikation des erstellten Modells dienen. Für die Umrechnung der Gasverbräuche in Wärmebedarfe wird ein Wirkungsgrad der Bestands-Gaskessel von 85 % im Mittel angenommen.

8.1.2 Spezifische Annahmen

Zur weiteren Detaillierung des Modells für den Wärmebedarf werden spezifische Annahmen getroffen, die eine Näherung an reale Bedarfe generieren sollen.

Soll-Raumtemperatur und Ferienkalender

Die Soll-Raumtemperatur beeinflusst die Sensibilität des modellierten und des realen Gebäudes auf die Außentemperatur. Steigt die Differenz zwischen Innenraumtemperatur und Außentemperatur, steigt auch der Wärmeübergang und somit der Heizwärmebedarf des Gebäudes (Abbildung 54).

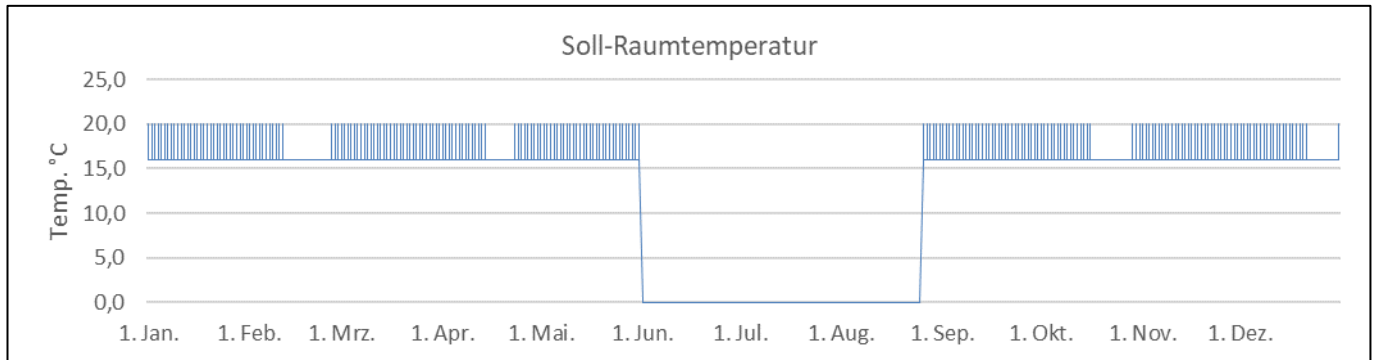


Abbildung 54: Annahme des Jahresverlaufs der Soll-Raumtemperatur

Die gewünschte Raumtemperatur wird mit 20 °C angenommen. Zwischen 17:00 Uhr und 7:00 Uhr, sowie in den Ferien, erfolgt eine Absenkung auf 16 °C. Der hinterlegte Ferienkalender für die Absenkung der gewünschten Raumtemperatur kann der Abbildung 55 entnommen werden. In den Sommermonaten ist die Heizung abgeschaltet und die Wunschtemperatur somit nicht dargestellt bzw. Null. Die Heizgrenze beträgt 15 °C (Abbildung 54).

Ferienkalender		
Ferien	Beginn	Ende
Winter	12.02.2022	26.02.2022
Ostern	15.04.2022	23.04.2022
Sommer	18.07.2022	26.08.2022
Herbst	17.10.2022	29.10.2022
Weihnachten	22.12.2022	31.12.2022

Abbildung 55: Ferienkalender.

8.1.3 Lastgangerstellung / Bedarfsermittlung

Die Bedarfsermittlung für den Rückert-Campus erfolgt vorerst je Gebäude. In der Variantenuntersuchung wird dann die gemeinsame Versorgung von Gebäuden zusätzlich betrachtet.

8.1.3.1 Oberschule Friedrich Rückert

Mit Hilfe der getroffenen Annahmen und der Datengrundlage aus den vorangegangenen Kapiteln wurde ein synthetischer Bedarfslastgang erzeugt. Dem Gebäude wurde eine Sensibilität gegenüber der Außentemperatur und Bodentemperatur zugewiesen. Der Warmwasserbedarf ist gering bzw. nicht vorhanden und wird nicht über die Geothermie bereitgestellt.

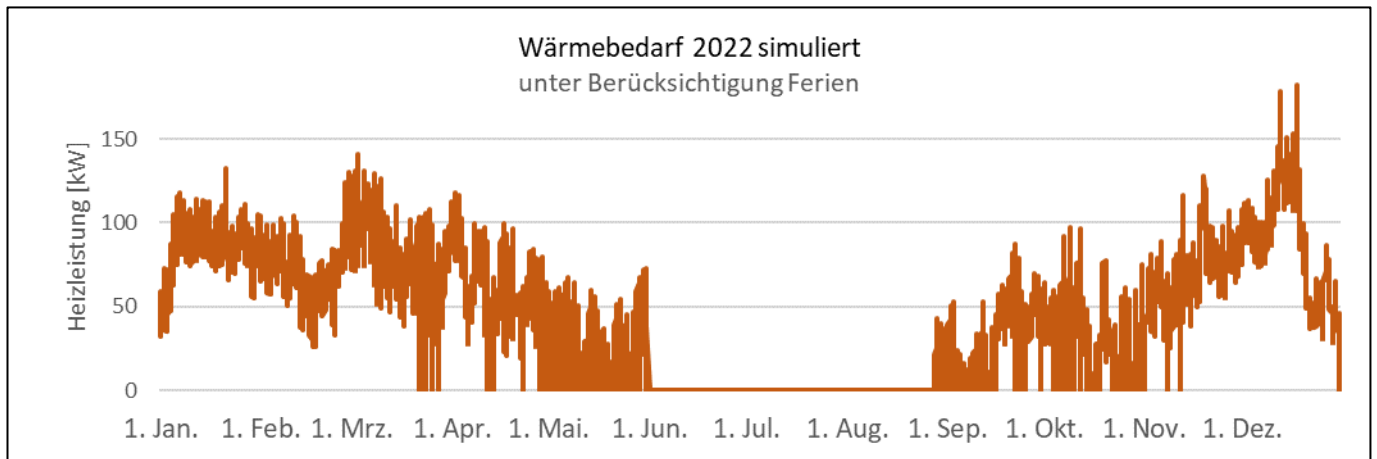


Abbildung 56: Simulierter Wärmebedarf der Rückert Oberschule

Aus der Simulation ergibt sich ein Wärmebedarf von 380.000 kWh und einer Wärmehöchstlast von ca. 180 kW (Abbildung 56). In Abhängigkeit der Dimensionierung der WP in Verbindung mit einem 2. Wärmeerzeuger kann der geothermische Bedarf berechnet werden. Da die Schule bereits über eine Gasversorgung verfügt, wird eine bivalente Variante mit der Spitzenlastdeckung durch Gas betrachtet, sowie eine monovalente Variante mit der ausschließlichen Versorgung über eine WP.

Monovalente Variante

Die monovalente Variante deckt den Wärmebedarf der Oberschule ausschließlich mit einer WP ab.

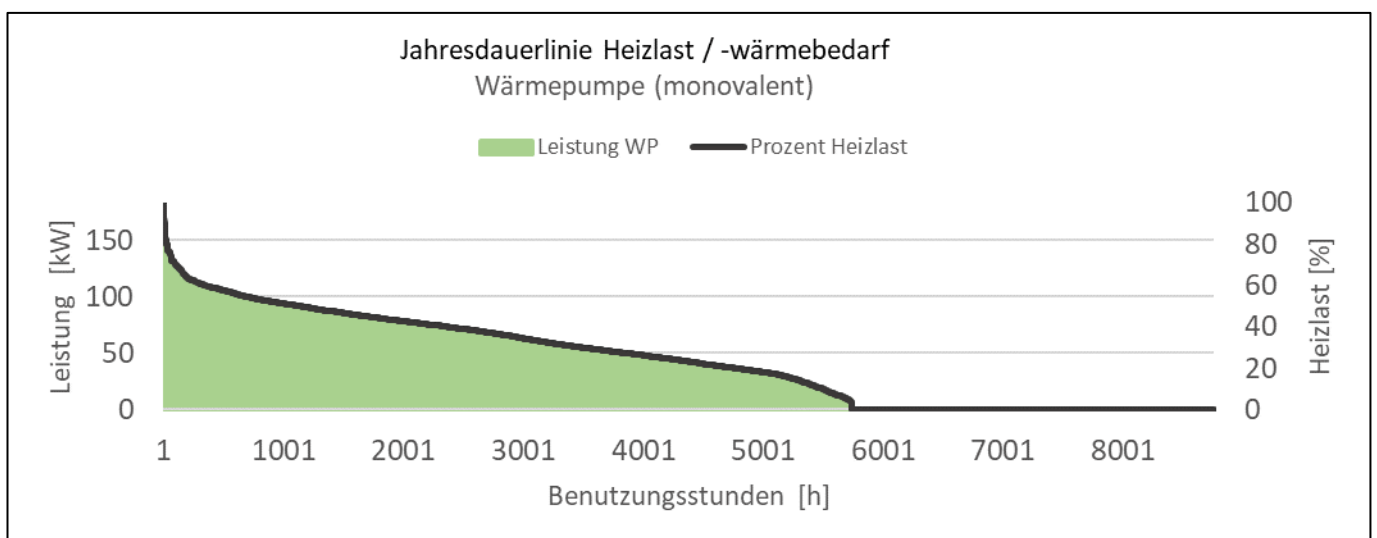


Abbildung 57: Jahresdauerlinie Rückert Oberschule monovalent

Die Jahresdauerlinie (Abbildung 57) zeigt, dass hohe Wärmelasten nur selten auftreten. Es werden ca. 5.800 Betriebsstunden zum Heizen benötigt, wobei ein Speicher noch nicht berücksichtigt wurde. Die Betriebsstunden des Jahres, in denen die Quelle nicht belastet wird, können zur Regeneration mit Luftwärme genutzt werden.

Die Abschätzung der benötigten Leistung der Rückkühler erfolgt nach den beschriebenen, allgemeinen Annahmen.

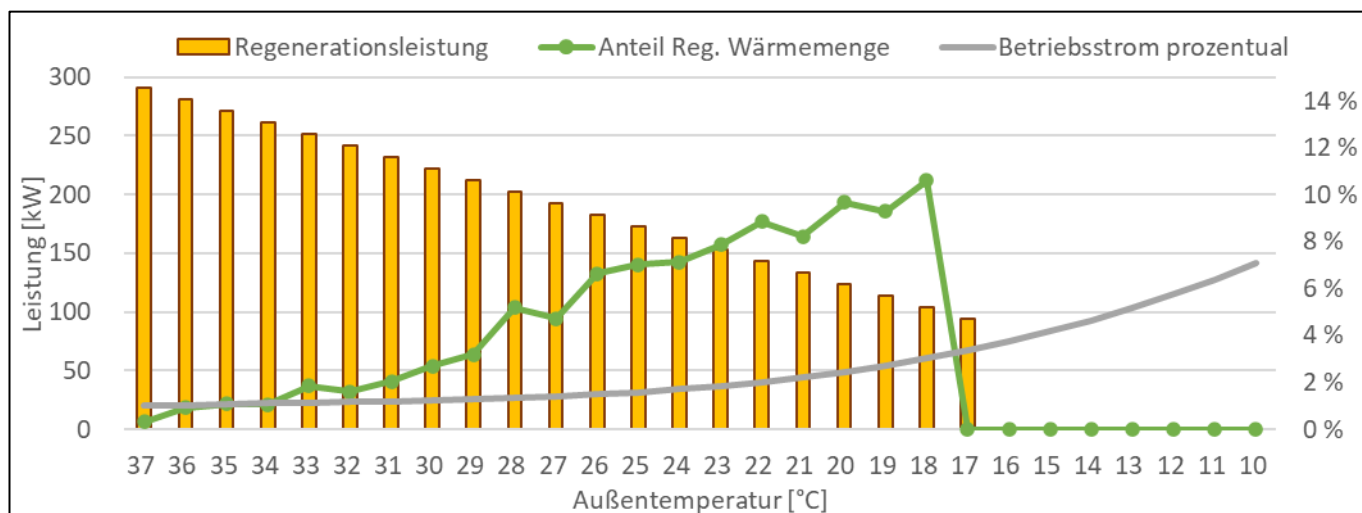


Abbildung 58: Regenerationsleistung Rückert Oberschule monovalent

Die Regenerationsleistung steht, gemäß der getroffenen Annahmen, im linearen Zusammenhang mit der Außentemperatur (Abbildung 58). Die regenerierte Wärmemenge stellt sich, je nach Häufigkeit der auftretenden Temperatur, ein. Der absolute, elektrische Betriebsstrom ist für jeden Betriebspunkt gleich, da die Ventilatoren mit maximaler Leistung betrieben werden (Abbildung 59).

Rückkühler	
Leistung RKW bei 27°C	193,9 kW
Freischalttemperatur RKW	17 °C
Umschaltpunkt RKW [5/10 K]	38 °C
Regeneration	266.763 kWh
	100,0 %
Strombedarf	5.435 kWh
	2,04 %
Betriebsstunden	1.846 h

Abbildung 59: Rückkühler Betriebsdaten Rückert Oberschule monovalent

Die Auslegung des Rückkühlers erfolgt mittels der Leistung des Systems bei einer Außentemperatur von 27 °C. Ab einer Temperatur von 17 °C wird regeneriert. Die Heizgrenze des Gebäudes sollte für die Simu-

lation unter diesem Wert liegen (hier 15 °C). Es wird ein ganzjähriger Betrieb mit einer Differenztemperatur von 5 Kelvin angenommen. Es wird die gesamte, dem Untergrund entzogene, Wärmemenge (100 %) regeneriert.

Bivalente Variante

Die Bivalente Variante deckt den Wärmebedarf mittels einer WP und dem Gaskessel im Bestand. Zur Erfüllung des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) wurde angenommen, dass 30 % der simulierten Wärmehöchstlast durch die WP gedeckt werden können.

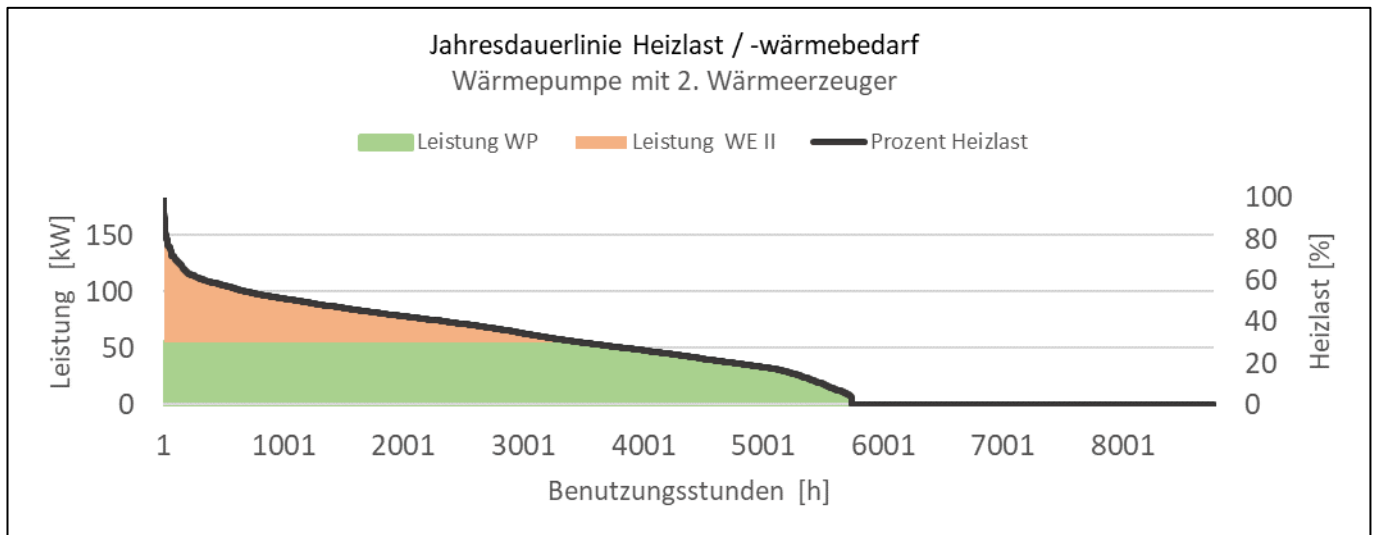


Abbildung 60: Jahresdauerlinie Rückert Oberschule bivalent

Mit dieser 30 % Auslegung lassen sich ca. 72 % des jährlichen Wärmebedarfs mit einer WP decken. Die hohen Lastenspitzen werden durch den Gaskessel erzeugt (Abbildung 60).

8.1.3.2 Grundschule Friedrich Rückert

Mit Hilfe der getroffenen Annahmen und der Datengrundlage aus den vorangegangenen Kapiteln wurde ein synthetischer Bedarfslastgang erzeugt. Dem Gebäude wurde eine Sensibilität gegenüber der Außentemperatur und Bodentemperatur zugewiesen. Der Warmwasserbedarf wurde mit 15 % des Gesamtwärmebedarfs angenommen und eine Zapfcharakteristik auf den Schulbetrieb angepasst (Abbildung 61).

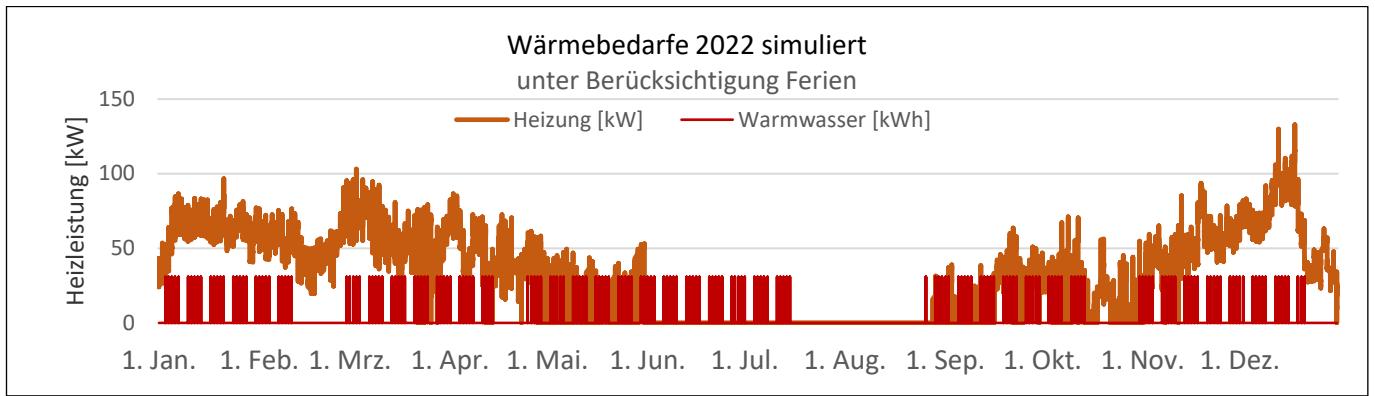


Abbildung 61: Simulierte Wärmebedarfe der Rückert Grundschule

Aus der Simulation ergibt sich ein Wärmebedarf von 330.000 kWh und eine Wärmehöchstlast von ca. 134 kW exklusive Warmwasserbereitung. In Abhängigkeit der Dimensionierung der WP kann in Verbindung mit einem 2. Wärmeerzeuger der geothermische Bedarf berechnet werden. Da die Schule bereits über eine Gasversorgung verfügt, wird eine bivalente Variante mit der Spitzenlastdeckung durch Gas betrachtet, sowie eine monovalente Variante mit der ausschließlichen Versorgung über eine WP.

Monovalente Variante

Die monovalente Variante deckt den Wärmebedarf der Grundschule ausschließlich mit einer WP (Abbildung 62).

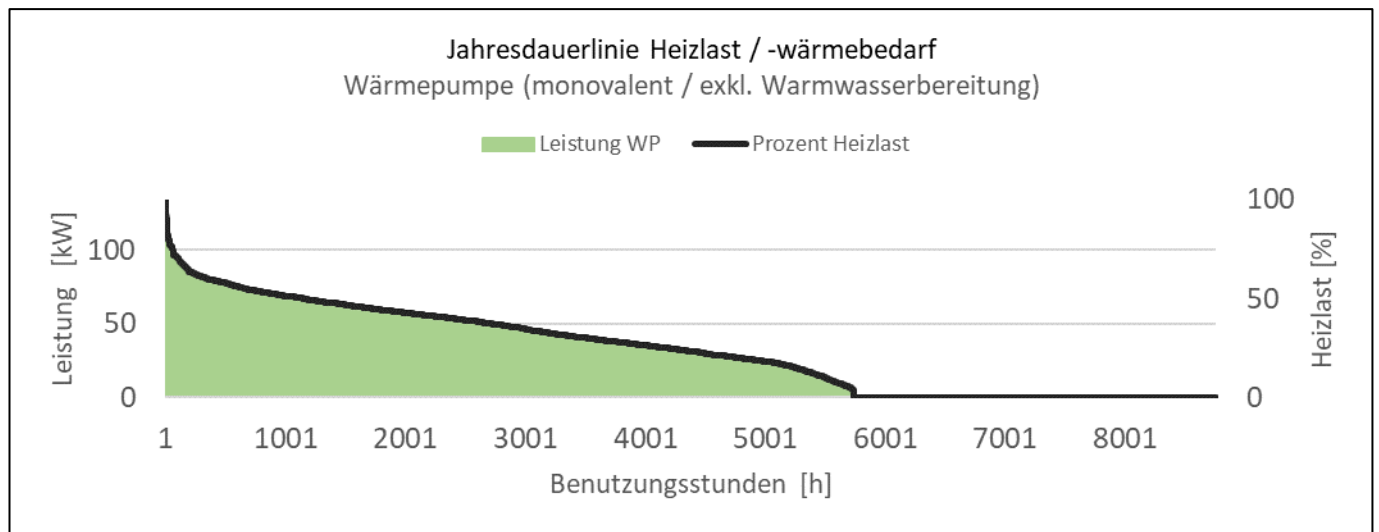


Abbildung 62: Jahresdauerlinie Rückert Grundschule monovalent

Die Jahresdauerlinie zeigt, dass hohe Wärmelasten nur selten auftreten. Es werden ca. 5.800 Betriebsstunden zum Heizen benötigt, wobei ein Speicher noch nicht berücksichtigt wurde. Die Betriebsstunden des Jahres, in denen die Quelle nicht belastet wird, können zur Regeneration mit Luftwärme genutzt werden.

Die Abschätzung der benötigten Leistung der Rückkühler erfolgt nach den beschriebenen, allgemeinen Annahmen.

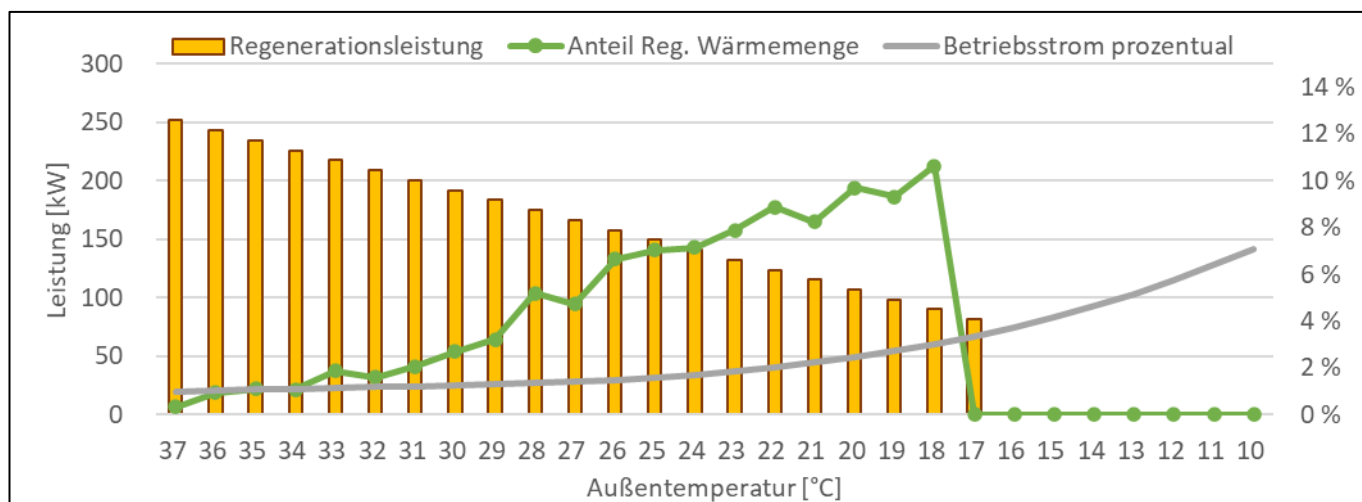


Abbildung 63: Regenerationsleistung Rückert Grundschule monovent

Die Regenerationsleistung steht, gemäß der getroffenen Annahmen, im linearen Zusammenhang mit der Außentemperatur (Abbildung 63). Die regenerierte Wärmemenge stellt sich, je nach Häufigkeit der auftretenden Temperatur, ein. Der absolute, elektrische Betriebsstrom ist für jeden Betriebspunkt gleich, da die Ventilatoren mit maximaler Leistung betrieben werden.

Rückkühler	
Leistung RKW bei 27°C	168 kW
Freischalttemperatur RKW	17 °C
Umschaltpunkt RKW [5/10 K]	38 °C
Regeneration	230.442 kWh
	100,0 %
Strombedarf	4.695 kWh
	2,04 %
Betriebsstunden	1.846 h

Abbildung 64: Rückkühler Betriebsdaten Rückert Grundschule monovent

Die Auslegung des Rückkühlers erfolgt mittels der Leistung des Systems bei einer Außentemperatur von 27 °C (Abbildung 64). Ab einer Temperatur von 17 °C wird regeneriert. Die Heizgrenze des Gebäudes sollte für die Simulation unter diesem Wert liegen (hier 15 °C). Es wird ein ganzjähriger Betrieb mit einer Differenztemperatur von 5 Kelvin angenommen. Es wird die gesamte, dem Untergrund entzogene, Wärmemenge (100 %) regeneriert.

Bivalente Variante

Die Bivalente Variante deckt den Wärmebedarf mittels einer WP und dem Gaskessel im Bestand. Zur Erfüllung des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) wurde angenommen, dass 30 % der simulierten Wärmehöchstlast durch die WP gedeckt werden können. Mit dieser 30 % Auslegung lassen sich ca. 66 % des jährlichen Wärmebedarfs mit einer WP decken (Abbildung 65). Die hohen Lastenspitzen werden durch den Gaskessel erzeugt.

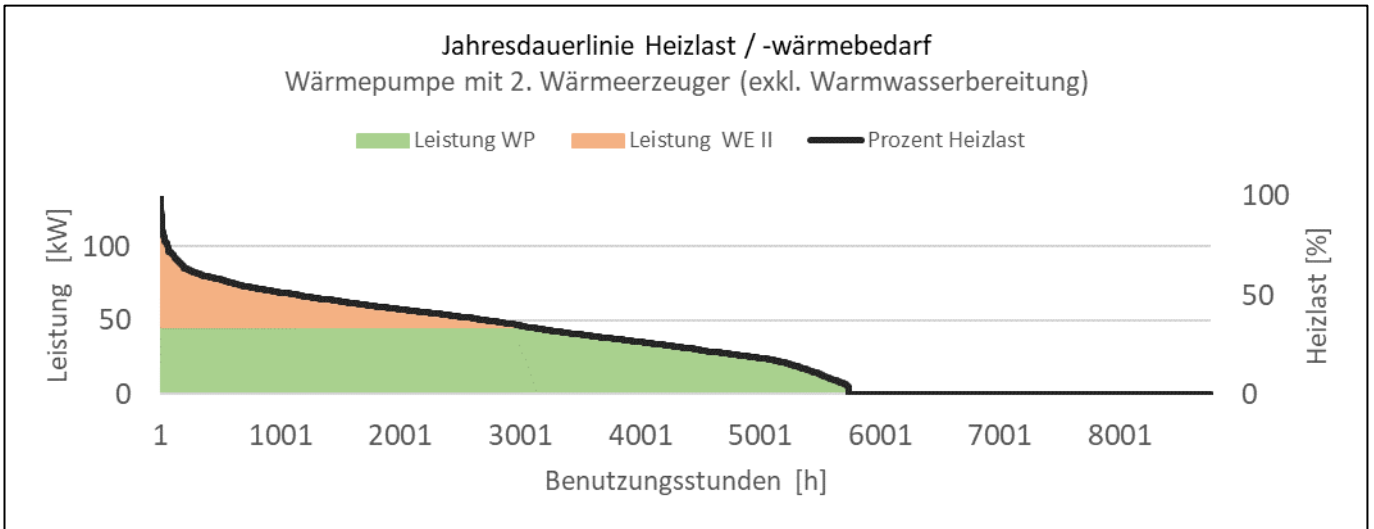


Abbildung 65: Jahresdauerlinie Rückert Grundschule bivalent

8.1.3.3 Hortgebäude Friedrich Rückert

Mit Hilfe der getroffenen Annahmen und der Datengrundlage aus den vorangegangenen Kapiteln wurde ein synthetischer Bedarfslastgang erzeugt. Dem Gebäude wurde eine Sensibilität gegenüber der Außentemperatur und Bodentemperatur zugewiesen. Der Warmwasserbedarf ist gering bzw. nicht vorhanden und wird nicht über die Geothermie bereitgestellt.

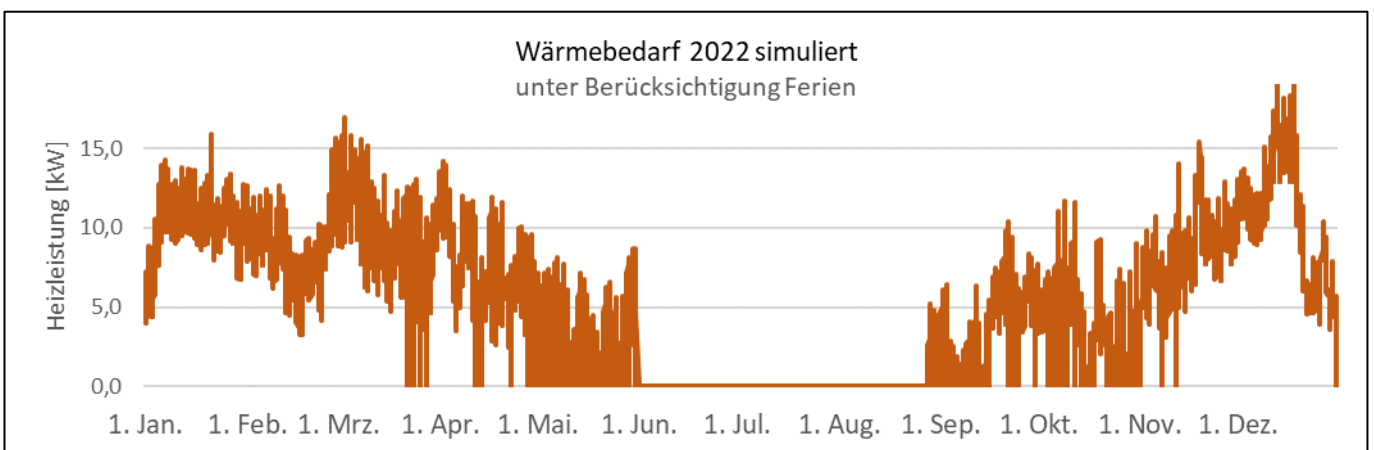


Abbildung 66: Simulierter Wärmebedarf des Hortgebäudes Rückert

Aus der Simulation ergibt sich ein Wärmebedarf von 46.000 kWh und einer Wärmehöchstlast von ca. 22 kW (Abbildung 66). In Abhängigkeit der Dimensionierung der WP in Verbindung mit einem 2. Wärmeerzeuger kann der geothermische Bedarf berechnet werden. Da der Hort bereits über eine Gasversorgung verfügt, wird eine bivalente Variante mit der Spitzenlastdeckung durch Gas betrachtet, sowie eine monovalente Variante mit der ausschließlichen Versorgung über eine WP.

Monovalente Variante

Die monovalente Variante deckt den Wärmebedarf des Hortgebäudes ausschließlich mit einer WP.

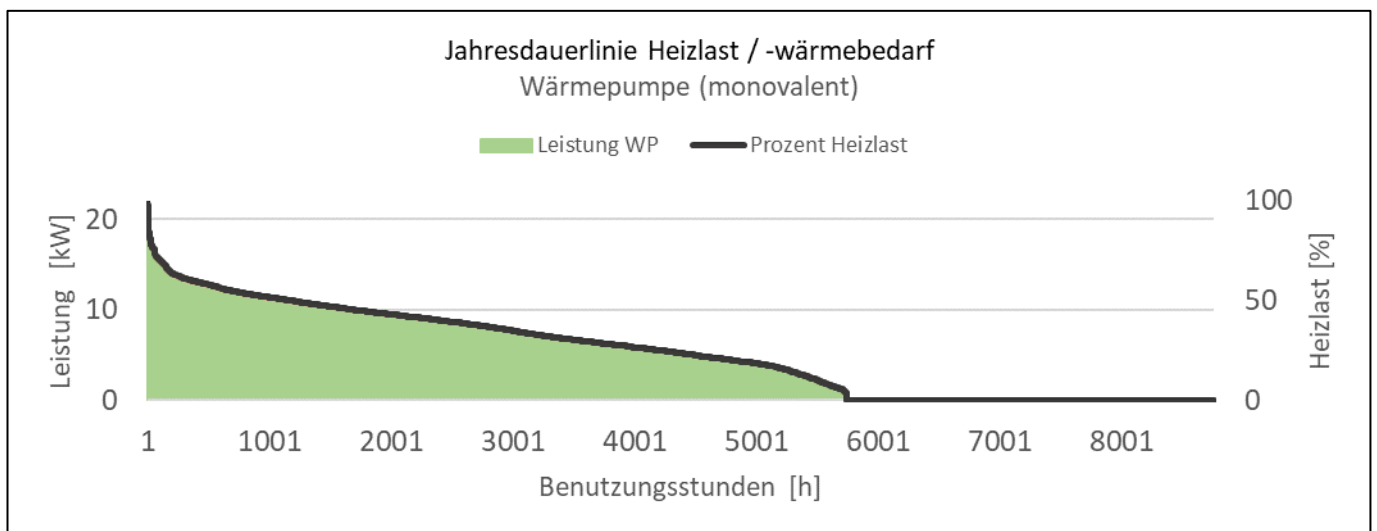


Abbildung 67: Jahresdauerlinie Rückert Hortgebäude monovalent

Die Jahresdauerlinie (Abbildung 67) zeigt, dass hohe Wärmelasten nur selten auftreten. Es werden ca. 5.800 Betriebsstunden zum Heizen benötigt, wobei ein Speicher noch nicht berücksichtigt wurde. Die Betriebsstunden des Jahres, in denen die Quelle nicht belastet wird, können zur Regeneration mit Luftwärme genutzt werden.

Die Abschätzung der benötigten Leistung der Rückkühler erfolgt nach den beschriebenen, allgemeinen Annahmen.

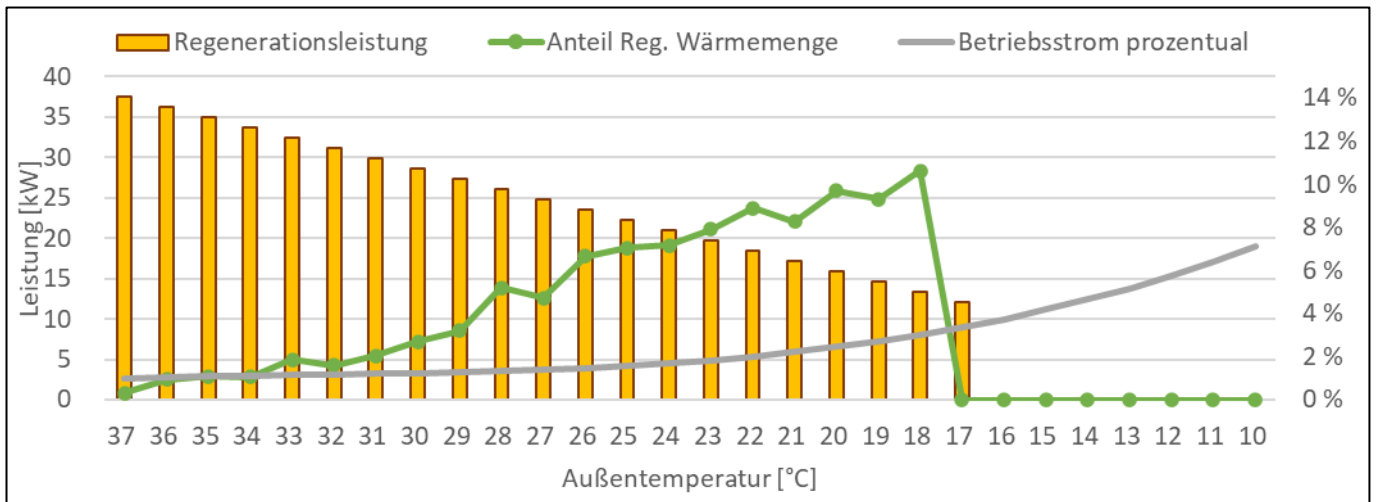


Abbildung 68: Regenerationsleistung Rückert Hortgebäude monovent

Die Regenerationsleistung steht, gemäß der getroffenen Annahmen, im linearen Zusammenhang mit der Außentemperatur (Abbildung 68). Die regenerierte Wärmemenge stellt sich, je nach Häufigkeit der auftretenden Temperatur, ein. Der absolute, elektrische Betriebsstrom ist für jeden Betriebspunkt gleich, da die Ventilatoren mit maximaler Leistung betrieben werden.

Rückkühler	
Leistung RKW bei 27°C	23,5 kW
Freischalttemperatur RKW	17 °C
Umschaltpunkt RKW [5/10 K]	38 °C
Regeneration	32.331 kWh
	100,0 %
Strombedarf	659 kWh
	2,04 %
Betriebsstunden	1.846 h

Abbildung 69: Rückkühler Betriebsdaten Rückert Hortgebäude monovent

Die Auslegung des Rückkühlers (Abbildung 69) erfolgt mittels der Leistung des Systems bei einer Außentemperatur von 27 °C. Ab einer Temperatur von 17 °C wird regeneriert. Die Heizgrenze des Gebäudes sollte für die Simulation unter diesem Wert liegen (hier 15 °C). Es wird ein ganzjähriger Betrieb mit einer Differenztemperatur von 5 Kelvin angenommen. Es wird die gesamte, dem Untergrund entzogene, Wärmemenge (100 %) regeneriert.

Bivalente Variante

Die bivalente Variante deckt den Wärmebedarf mittels einer WP und dem Gaskessel im Bestand. Zur Erfüllung des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) wurde angenommen, dass 30 % der simulierten Wärmehöchstlast durch die WP gedeckt werden können.

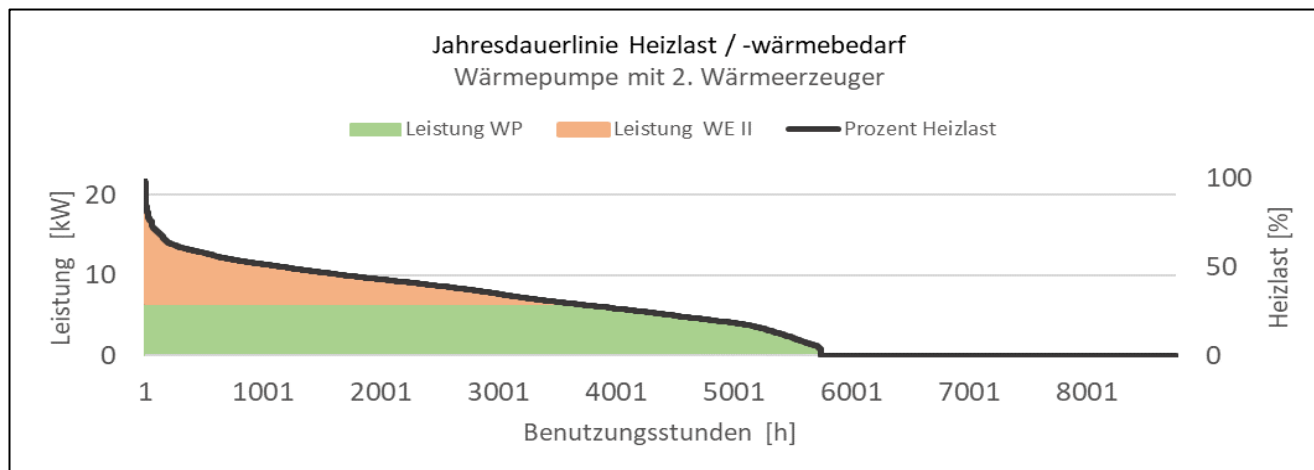


Abbildung 70: Jahresdauerlinie Rückert Hortgebäude bivalent

Mit dieser 30 % Auslegung lassen sich ca. 72 % des jährlichen Wärmebedarfs mit einer WP decken. Die hohen Lastenspitzen werden durch den Gaskessel erzeugt (Abbildung 70).

8.1.4 Zusammenfassung Rückert Campus

Die simulierten Lastgänge für Wärmebedarfe dienen der Dimensionierung der geothermischen Wärmequelle und der Wärmeerzeuger. Da die drei Gebäude über einen gemeinsamen Innenhof verfügen, wird unter anderem eine gemeinsame geothermische Anbindung geprüft.

Monovalente Versorgung

Für eine monovalente Versorgung sind folgende Versorgungsparameter ermittelt worden (Abbildung 71). Zur Bereitstellung von ca. 750.000 kWh Wärme müssen ca. 576.000 kWh durch die Geothermie entzogen werden. Die Quelle sollte dabei auf ca. 240 kW ausgelegt sein. Mit Hilfe der Dimensionierung der Wärmeerzeuger und der Speicher kann Einfluss auf die Entzugsleistung genommen werden.

	Monovalente Wärmeerzeugung				
	Oberschule	Grundschule	Hort	Summe	
Wärmehöchstlast	183	134	22	338	kW
Angenommene Heizlast	210	154	25	389	kW
Wärmebedarf	377.856	326.328	45.922	750.106	kWh
Leistung Geothermie Quelle	127	99	15	241	kW
Wärmemenge Geothermie Quelle	289.727	250.750	35.216	575.693	kWh

Abbildung 71: Leistungen und Wärmemengen monovalente Versorgung

Rückkühler der monovalenten Versorgung

Es besteht die Möglichkeit die drei Gebäude des Rückert Campus zentral zu versorgen. Im Fall einer monovalenten, zentralen Versorgung des Campus werden Rückkühler mit einer Leistung von ca. 385 kW bei 27 °C benötigt. Es können dann 530.000 kWh bei Lufttemperaturen über 17 °C regeneriert

werden (Abbildung 72). Dafür wird elektrischer Betriebsstrom von ca. 2 % der regenerierten Wärmemenge benötigt.

Rückkühler Rückert Campus	
Gesamtleistung RKW bei 27°C	385 kW
Freischalttemperatur RKW	17 °C
Umschaltpunkt RKW [5/10 K]	38 °C
Regeneration	529.535 kWh
	100,0 %
Strombedarf	10.789 kWh
	2,04 %
Betriebsstunden	1.846 h

Abbildung 72: Rückkühler Betriebsdaten Rückert Campus gesamt monovalent

Bivalente Versorgung

Für eine bivalente Versorgung sind folgende Versorgungsparameter ermittelt worden.

	Bivalente Wärmeerzeugung				
	Oberschule	Grundschule	Hort	Summe	
Wärmehöchstlast	183	134	22	338	kW
Angenommene Heizlast	210	154	25	389	kW
Wärmebedarf	377.856	326.328	45.922	750.106	kWh
Leistung Geothermie Quelle	43	32	5	81	kW
Wärmemenge Geothermie Quelle	210.822	165.228	25.432	401.482	kWh
Wärmemenge elektrisch	62.511	48.445	7.537	118.493	kWh
Wärmemenge Gas	104.524	112.654	12.953	230.131	kWh

Abbildung 73: Leistungen und Wärmemengen monovalente Versorgung

Zur Bereitstellung von ca. 750.000 kWh Wärme müssen ca. 400.000 kWh durch die Geothermie entzogen werden. Die Quelle sollte dabei auf ca. 81 kW ausgelegt sein. Der Gaskessel würde so etwa 230.000 kWh erzeugen. Mit Hilfe der Dimensionierung der Wärmeerzeuger und der Speicher kann Einfluss auf die Entzugsleistung genommen werden.

8.2 Potenzialanalyse Photovoltaik

Die Photovoltaikanlage ist in der Lage den Eigenstrombedarf der WP und evtl. installierten Rückkühler bis zu einem bestimmten Anteil zu decken. Neben der Wärmeversorgung kann auch der Allgemeinstrombedarf anteilig gedeckt werden. Durch die hohen Strombezüge für die geplante Wärmeversorgung kann sich ein wirtschaftlicher Vorteil durch die Installation einer PV-Anlage einstellen. Es wird die maximal mögliche Belegung der Dachflächen untersucht (Abbildung 74).

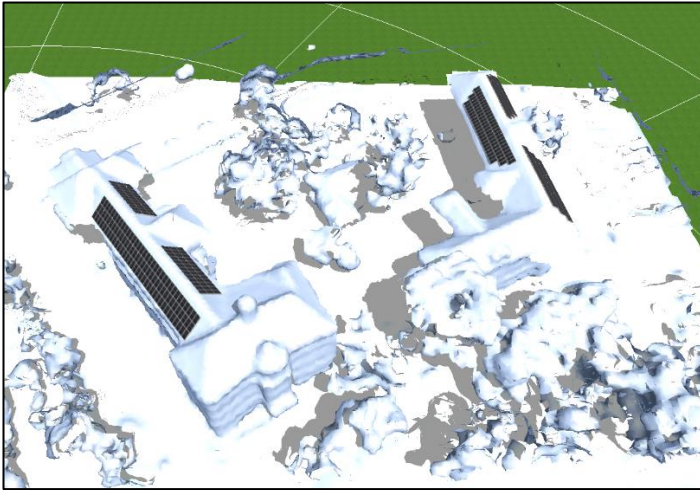
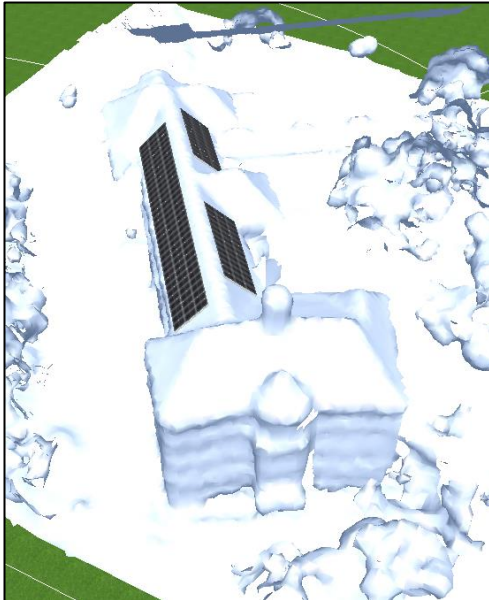


Abbildung 74: 3D-Photovoltaik-Simulation Rückert Campus

Die geplante Modulbelegung der Dächer am Rückert Campus wurde mit PV*Sol premium 2024 simuliert. Dafür wurden Daten des Landesamtes für Geobasisinformation Sachsen (GeoSN) verwendet. Ein digitales Geländemodell, welches mittels Laserscan erstellt wurde, ist online abrufbar. Die Punktwolken wurden komprimiert, vernetzt und mögliche Belegungsflächen berechnet. So kann die Verschattung durch Gebäude und Vegetation berücksichtigt werden. Die Dachflächen der beiden Schulen wurden in Ost-West-Ausrichtung belegt, um einen Erzeugungslastgang zu generieren, der dem möglichen Verbraucherlastgang einer typischen Schule entspricht. Somit kann eine Eigenbedarfsdeckung bereits vormittags, bis in den Nachmittag sichergestellt werden. Eine reine Süd-Ausrichtung der Anlage kann zu Mittagsspitzen in der Erzeugung führen, die nicht abgenommen werden können und in den Netzverbund eingespeist werden müssen.

Oberschule

Die Ost-West-Ausrichtung der Module erfolgte in möglichst rechteckiger Anordnung (Abbildung 75).



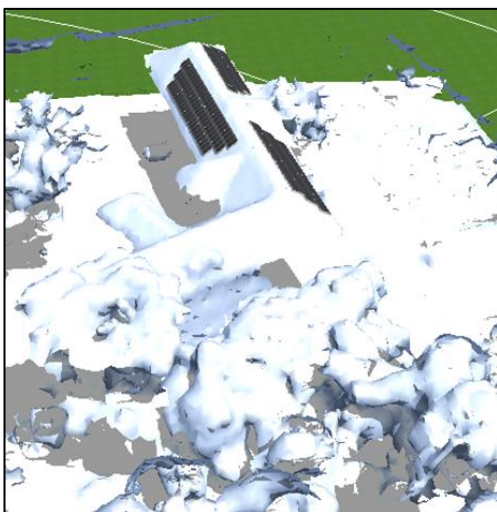
Oberschule	
Peakleistung	65 kWp
Performance Ratio	84 %
Jahresertrag	52.000 kWh/a
Ausrichtung	Ost-West
Modulleistung	375 W
Anzahl Module	174 Stk.

Abbildung 75: 3D-Photovoltaik-Simulation Rückert Oberschule

Mit der gewählten Belegung von 174 Solarmodulen mit insgesamt ca. 65 kWp können 52.000 kWh pro Jahr generiert werden.

Grundschule

Die Anlage der Grundschule ist ebenfalls in Ost-West-Richtung ausgerichtet (Abbildung 76). Der Ertrag durch geringere Verschattung und eine geringfügige Drehung des Daches führt zu einem höheren Ertrag im Vergleich zur Oberschule.



Grundschule	
Peakleistung	65 kWp
Performance Ratio	86 %
Jahresertrag	54.000 kWh/a
Ausrichtung	Ost-West
Modulleistung	375 W
Anzahl Module	172 Stk.

Abbildung 76: 3D-Photovoltaik-Simulation Rückert Grundschule

Mit der gewählten Belegung von 172 Solarmodulen mit insgesamt ca. 65 kWp können 54.000 kWh pro Jahr generiert werden. Der Jahres-Erzeugungs-Lastgang ist in Abbildung 77 dargestellt.

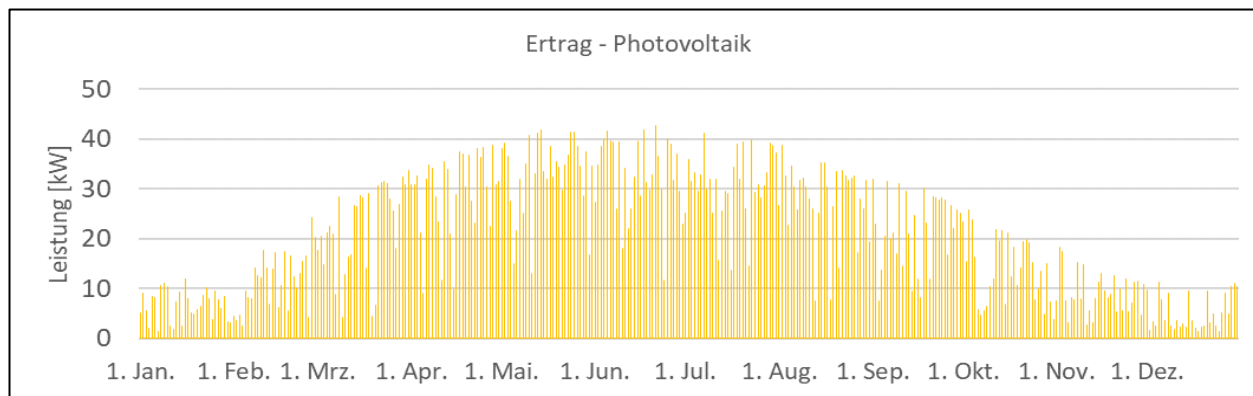


Abbildung 77: Photovoltaik Jahres-Erzeugungslastgang Rückert Grundschule

8.3 Potenzialanalyse Wärmequellen

8.3.1 Potenzialanalyse Luftwärmenutzung

Die benötigte Rückkühlleistung wurde im Kapitel 8.1.4 abgeschätzt. Bei ca. 27 °C sollten die Rückkühler ca. 385 kW leisten. Anhand der Grobauslegung kann eine reale Maschine, welche die Randbedingungen erfüllt, bezüglich der möglichen Verortung und der Schallemissionen analysiert werden (Tabelle 14).

Tabelle 14: Technische Daten Rückkühler (Beispielgerät)

Kenngröße	Wert
Leistung	385 kW
Wärmeträger	Ethylenglykol, 34 %
Eintrittstemperatur (Luft)	27,0 °C
Austrittstemperatur (Luft)	16,0 °C
Eintrittstemperatur (Wärmeträger)	5,0 °C
Austrittstemperatur (Wärmeträger)	10,0 °C

8.3.2 Potenzialanalyse Geothermie

Die geologischen und räumlichen Gegebenheiten erlauben prinzipiell den Einsatz eines Erdwärmesondenfeldes. Die Freifläche des betreffenden Gebietes erlaubt die Umsetzung von bis zu 48 Erdwärmesonden mit einem Abstand von 8 m und bis zu 45 Erdwärmesonden mit einem Abstand von 10 m. Völlig unzureichend erscheint die Freifläche hingegen für den Einsatz von Erdwärmekollektoren, gegen deren Einsatz auch die Nutzung der Freifläche als Schulhof spricht, wo zumindest eine teilweise Verfestigung und Versiegelung und somit Begrenzung des Wasserzuflusses angenommen werden kann. Das Potenzial für den Einsatz von Erdwärmekörpern scheint etwas höher zu sein als für Erdwärmekollektoren. Allerdings entsteht aufgrund des oberflächennahen Festgesteins und damit einer schlechten Grabbarkeit ein hoher Kostenaufwand für die Errichtung der Erdwärmekörper. Da diese nach der Errichtung nicht überbaut werden dürfen ist die Verfügbarkeit von Freiflächen am Standort ausschlaggebend für die Abdeckung des Energiebedarfs. Aufgrund der geringen Platzverfügbarkeit am Rückert Campus und der geologisch anspruchsvollen Voraussetzungen in Plauen, welche hohe Anforderungen zur Umsetzung

von Erdwärmekörpern mit sich bringen, können Erdwärmekörper für den Standort nicht empfohlen werden.

Tabelle 15: Möglichkeiten zur Erdwärmenutzung für Rückert Campus

	Rückert Campus
Geschlossene Systeme	
Erdwärmekollektoren	nicht machbar
Erdwärmesondenfelder	machbar
Erdwärmekörper	nicht machbar
thermisch aktive Bauteilsysteme	nicht machbar
Offene Systeme	
Grundwasserwärmepumpen	nicht machbar
Grubenwasser	nicht machbar
Tiefe Geothermie	
Tiefe EWS	machbar

Der Einsatz von thermisch aktivierten Gebäudeteilen und Energiepfählen kann grundsätzlich ausgeschlossen werden, da kein Neubau am Standort geplant ist. Die bestehenden Gebäude werden adäquat saniert und der Einbau weiterer raumbedeutsamer Bauteile ist nicht anzunehmen. Die bekannten geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse des Beispielgebietes lassen die Nutzung von Grundwasserwärme in keiner Form zu.

8.3.2.1 Positionierung der Sonden am Standort

Das Beispielgebiet des Rückert Campus besteht aus mehreren Schulgebäuden, die von einem gepflasterten bzw. betonierten Schulhof umgeben sind. Diese Flächen kommen prinzipiell für die Betrachtung von Erdwärmesonden in Betracht, da sie im Anschluss an die Bauarbeiten wieder versiegelt und genutzt werden können. Zu den unbenutzbaren Flächen gehören die auf dem Schulhof befindlichen Bäume sowie das Hort-Gebäude. Eine Analyse der freien Fläche ergab 2.097 m², welche für die Nutzung der Erdwärme zur Verfügung steht (Abbildung 79).



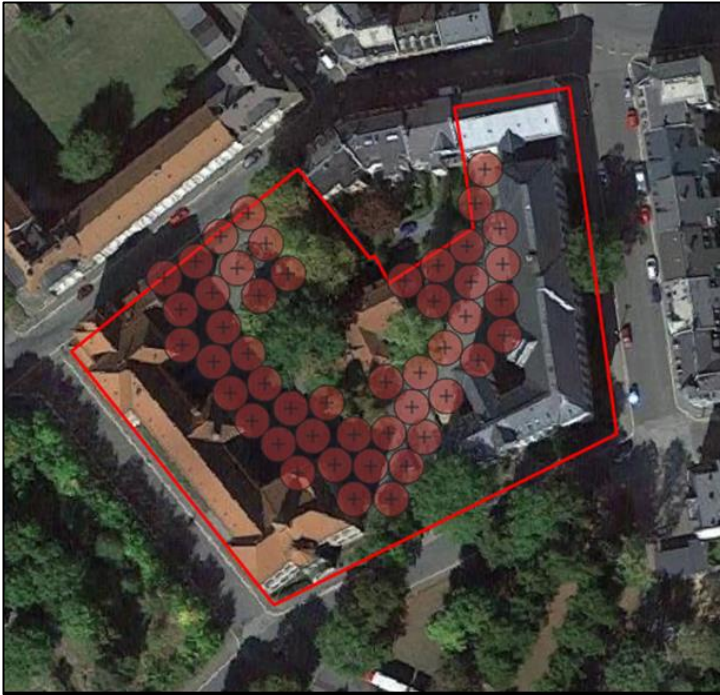
Abbildung 78: Schulhof im Beispielgebiet Rückert Campus



Quelle: GEOSN, 2023a

Abbildung 79: Definition der Freifläche für die Erdwärmennutzung im Beispielgebiet Rückert Campus

Mit einer Kombination aus Monte-Carlo- und qualifizierter Schätzung wurden 51 Erdwärmesonden in einer unregelmäßigen Konfiguration in der identifizierten Freifläche platziert. Dabei wurde ein 2 m Abstand zu Bestandsgebäuden und Baumkronen, ein 3 m Abstand zu Nachbargrundstücken und ein 8 m Sondenabstand eingehalten. Nach Abwägung der operativen Risiken der Bohrungen wurde die maximale Gesamtzahl der Erdwärmesonden auf eine konservative Anzahl von 48 reduziert (Abbildung 80). Bei einem Abstand von 10 m können maximal 45 Sonden auf der Fläche positioniert werden. Diese Anzahl der Erdwärmesonden und ihre Verteilung innerhalb des Rückert Campus-Beispielgebietes sind auch die Eingangsparameter für eine Variantenlösung zur Versorgung des Rückert-Campusgebäudes, um die Machbarkeit bzw. Optimierung der Nutzung des Erdwärmesondenfeldes als Wärmequelle zu überprüfen.



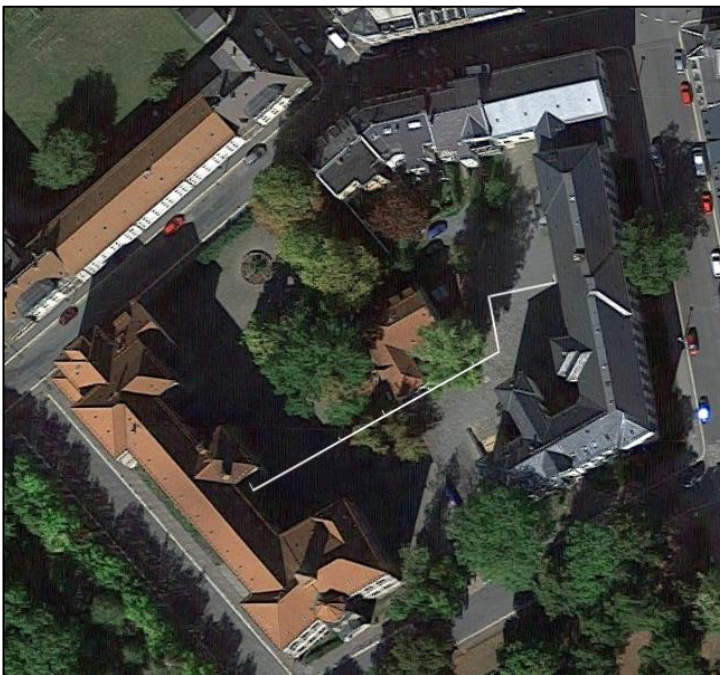
Quelle: GEO SN, 2023b

Abbildung 80: Konservative Betrachtung möglicher Bohransatzpunkte am Rückert Campus mit 8 m Abstand.

8.4 Quartiersanalyse

8.4.1 Wärmetrasse zur zentralen Versorgung

Die zentrale Versorgung des Rückert Campus würde eine ca. 85 m lange Wärmetrasse, von Heizraum zu Heizraum, über den Innenhof notwendig machen. Es wird die Versorgung aus der Grundschule angenommen (Abbildung 81).



Quelle: GEO SN, 2023b

Abbildung 81: Mögliche Trassierung Rohrleitung Rückert Campus (weiße Linie)

Die Erdverlegung der geplanten Trasse führt zu Transmissionswärmeverlusten im Erdreich, die im Folgenden bewertet werden (Abbildung 82).

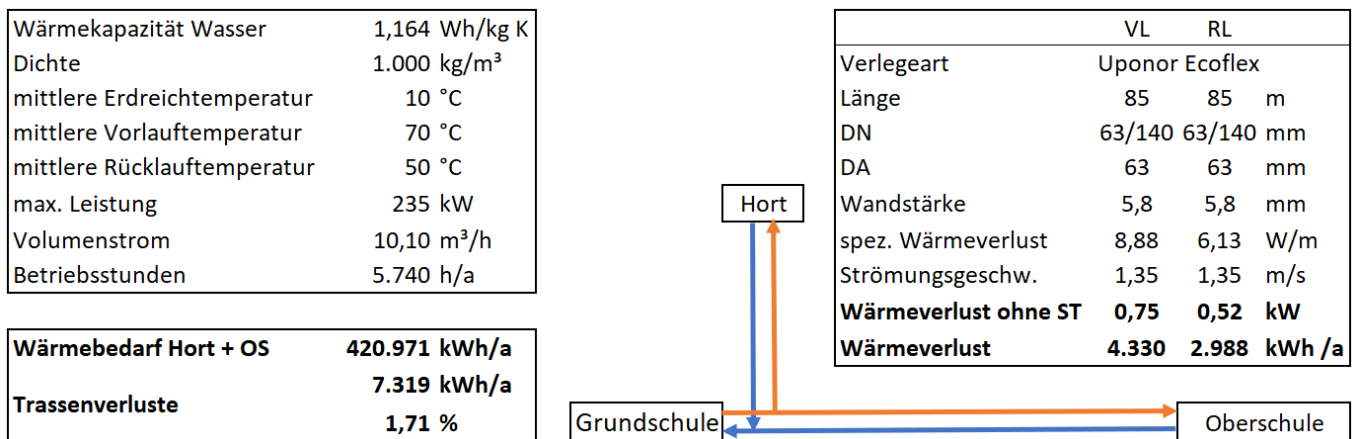


Abbildung 82: Transmissionswärmeverluste Rohrleitung Rückert Campus

Für die Ermittlung der Wärmeverluste wurden die spezifischen Werte für ein handelsübliches Rohr verwendet. Die Dimension wurde an die maximal übertragene Heizleistung angepasst. Die Trassenverluste betragen ca. 2 % der jährlich übertragenen Wärmemenge.

zentral	dezentral
Gleichzeitigkeiten des Wärmebedarfs der 3 Gebäude	Gleichzeitigkeit eines Gebäudes
Kleinere Dimensionierung der Wärmeerzeuger (insb. WP)	größere Dimensionierung der Wärmeerzeuger (insb. WP)
Kleinere Dimensionierung Geothermische Quelle	größere Dimensionierung Geothermische Quelle
Flexibilität in der Wärmeverteilung und Wahl der Wärmequelle	
Bidirektionale Versorgung erhöht die Redundanz, wenn z.B. die Gaserzeuger im Bestand erhalten bleiben	
Unidirektionale Versorgung macht Gebäude ohne eigenen Erzeuger abhängig vom zentralen Erzeuger	
Mehraufwand durch zusammenhängende Regelung	Keine gebäudeübergreifende Regelung
Investitionskosten der „Wärmetrasse über den Hof“	Keine Trasse
Wärmeverluste Wärmetrasse	Keine Trasse, keine Trassenverluste

Abbildung 83: Qualitativer Vergleich - zentrale und dezentrale Wärmeversorgung Rückert Campus

8.5 Variantenerstellung

Die zukünftige Wärmeversorgung des Rückert Campus kann mit verschiedenen hohen Anteilen erneuerbarer Energien (EE) bzw. zentral oder dezentral erfolgen (Abbildung 84).

	Min EE	Opt. EE	Max EE
Wärmeerzeuger	Bivalent	Bivalent	Monovalent
EE-Anteil	65 %	> 65 %	100 %
Anteil Sondenregeneration	100 %	100 %	100 %
Investitionskosten	gering	Optimiert*	hoch
Betriebskosten	hoch	Optimiert*	gering
Versorgung	zentral	zentral	zentral
*optimiert auf Gesamtkosten über best. Zeitraum			

Abbildung 84: Varianten Wärmeversorgung Rückert Campus

Die zu untersuchenden Varianten werden über ihren Anteil erneuerbarer Energie an der erzeugten Wärme definiert. Für alle Varianten wurde eine zentrale Versorgung als vorteilhaft bewertet. Eine Veränderung der Wärmeübergabe (Heizkörper etc.) ist zunächst nicht vorgesehen. Für alle Varianten bietet sich eine PV-Anlage zur Senkung des Netz-Strombezugs an, was bei angemessener Dimensionierung zu einer Verringerung der Betriebskosten führt.

Variante Min EE

Der erneuerbare Anteil von 65 % wird in dieser Variante als zukünftig zu erreichendes, gesetzlich vorgegebenes, Minimum angenommen. Ziel dieser Variante sind minimale Investitionskosten zu erzielen. Da Erdwärmesonden und WP hohe spezifische Investitionskosten aufweisen, wird die Leistung dieser Erzeuger so gering wie möglich gewählt, sodass die genannten 65 % noch erreicht werden. Der überwiegende Teil der Heizlast und die verbleibenden 35 % der Wärmemenge werden durch einen oder mehrere der Bestands-Gaskessel gedeckt. Es ergibt sich ein bivalentes System. Der gewählte Anteil der regenerierten, im Verhältnis zur entzogenen, Wärmemenge beträgt 100 %. So kann das Sondenfeld kleiner dimensioniert werden und die Vergleichbarkeit mit den anderen Varianten bleibt erhalten. Durch den höheren Gasverbrauch und den geringeren Anteil der ("kostenlosen") genutzten Umweltwärme, sind, im Vergleich zu den anderen Varianten höhere Betriebskosten zu erwarten.

Variante Max EE

Die Variante Max EE zielt auf einen maximalen erneuerbaren Anteil der Wärmeversorgung ab. Die WP soll den gesamten Jahres-Wärmebedarf decken, wodurch ein monovalentes System entsteht. Höhere spezifische Kosten für Sonden und WP steigern den nötigen Invest. Im Vergleich fallen die Betriebskosten jedoch geringer aus, da ein großer Anteil Umweltwärme genutzt wird. Um 100 % EE zu erzielen, muss auch der gesamte Betriebsstrom aus erneuerbaren Quellen stammen.

Variante Opt EE

Die optimierte Variante ist zwischen den anderen beiden Varianten positioniert und wird auf Gesamtkosten des Systems, über einen noch zu bestimmenden Zeitraum (z.B. 20 Jahre), optimiert. Die Betriebskosten über den gewählten Zeitraum und die Investitionskosten bilden die Gesamtkosten. Genaue Betriebsparameter und die Auslegung der Anlagen richtet sich nach der Min- und Max-Variante.

Zentrale Versorgung

Die zentrale Versorgung des Schulkomplexes wird in jeder Variante aufgrund folgender Kriterien als vorteilhaft bewertet:

- spezifische Kosten für WP sinkend mit steigender Leistung,
- spezifischer Platzbedarf sinkt mit steigender Leistung,
- Platzbedarf für Speicher sinkt mit Anlagengröße,
- es wird nur eine Regelung für die Erzeuger benötigt,
- Wartungskosten sind voraussichtlich geringer,
- Sondenanbindung in nur eine Zentrale,
- bei Installation mehrerer WP, können diese kaskadiert werden (Effizienz),
- wenn Wärmerzeuger in beiden Schulen stehen, besteht eine beidseitige Besicherung.

Die Anschlussleistung der WP wurde vorerst vernachlässigt. Ein direkter Betrieb der WP mit einem Rückkühlwerk als Wärmequelle wird in diesem Variantenvergleich nicht betrachtet. Das Betriebsregime der Erzeuger wird als bivalent parallel simuliert.

8.6 Geothermische Dimensionierung

8.6.1 Geothermische Randbedingungen

Die geothermischen Eigenschaften des Untergrundes sind für jeden Standort spezifisch und können auch kleinräumig signifikant variieren. Die Gesteinseigenschaften werden durch verschiedene Parameter beeinflusst, wobei besonders Wassergehalt, Grundwasserfluss, Dichte und regionale Unterschiede als Einflussfaktoren zu nennen sind. Da im Rahmen des Forschungsprojektes kein Thermal Response Test (TRT) zur Bestimmung der Untergrundeigenschaften am Standort durchgeführt wurde, werden diese mithilfe vorhandener Daten für verschiedene Tiefen ermittelt. Die dafür verwendete Vorgehensweise wird im Folgenden dargestellt.

8.6.1.1 Wärmeleitfähigkeit

Das Geothermische Modell des Rückert Campus weist eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 2,0 W/(m·K) auf. Dieses Ergebnis ist eine logische Folge des monotonen Charakters des geologischen Umfelds in dem Beispielgebiet. Diese Information wird auch durch die Bereichsstatistik der Wärmeleitfähigkeitswerte für verschiedene Niveaus geliefert (Tabelle 16, Abbildung 85). Im Beispielgebiet oder in seiner unmittelbaren Umgebung wurde keine TRT durchgeführt. Zur Verifizierung der Werte wurden daher die Ergebnisse eines etwa 1.250 m südlich im Beispielgebiet Bahnhofsvorstadt durchgeführten TRT herangezogen, dessen geologische Lage analog ist. Die interpretierte Wärmeleitfähigkeit wurde auf der Basis des Tests mit 2,05 W/(m·K) ermittelt, ein Wert, der unter Berücksichtigung des üblichen Fehlers von $\pm 0,1$ W/(m·K) sehr gut mit der Modellvorhersage übereinstimmt.

Tabelle 16: Mittelwerte, Minima und Maxima der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Tiefenstufen im Beispielsgebiet Rückert Campus, gerundet

Tiefe	50 m	100 m	150 m	200 m	250 m	300 m	350 m	400 m
	effektive Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]							
Mittelwert	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Min	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Max	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

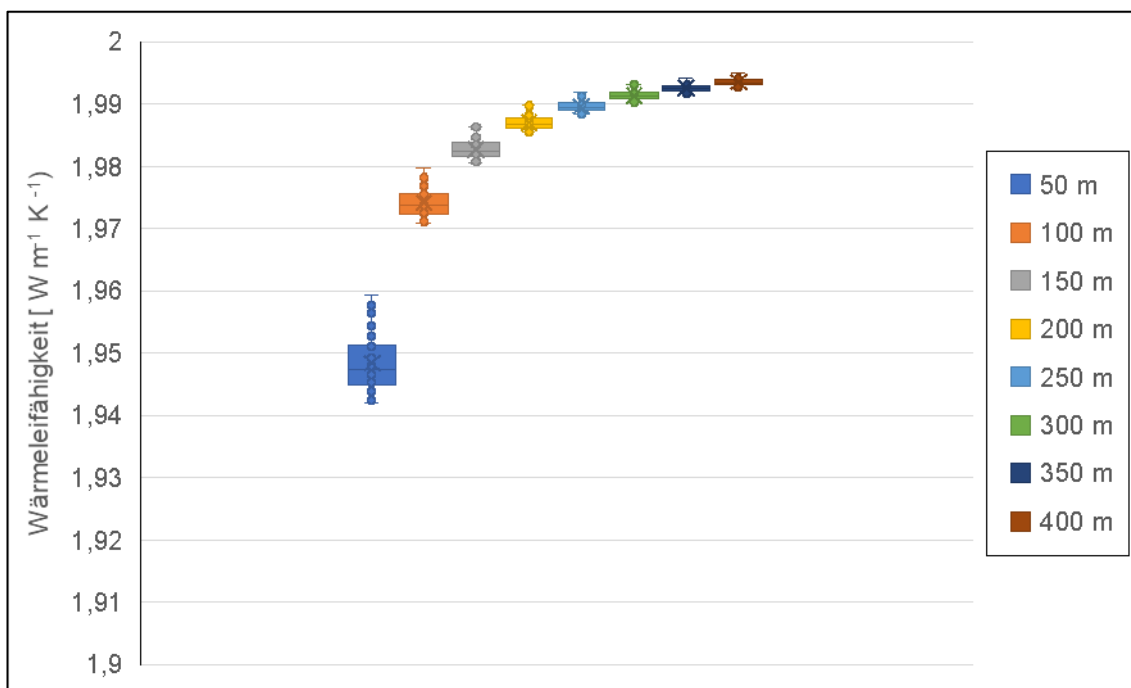


Abbildung 85: Verteilung der Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Tiefenstufen im Beispielsgebiet Rückert Campus

8.6.1.2 Untergrundtemperatur

Für die geothermische Dimensionierung wurde ein 1D-Modell der Temperaturentwicklung mit der Tiefe für die umliegenden Beispielgebiete (rund um die Stadt Plauen) erstellt (siehe Kapitel 4.2.3). Die Tabelle 17 zeigt die durchschnittlichen Temperaturen der Gesteinsumgebung für Tiefenstufen von 50 bis 400 m mit einer Schrittweite von 50 m.

Tabelle 17: Temperaturprofil des Beispielgebiets Rückert Campus gemäß dem konstruierten linearen 1D-Modell

Tiefe	50 m	100 m	150 m	200 m	250 m	300 m	350 m	400 m
q_{geo} [mW/m ²]	45							
λ_{eff} [W/(m·K)]	2,0							
Mitteltemperatur [°C]	9,6	10,1	10,7	11,3	11,8	12,4	12,9	13,5

8.6.2 Simulationsrandbedingungen

Die Simulation der geothermisch abdeckbaren Energiemenge wird mittels EED durchgeführt. Als Grundlage der Berechnungen werden die zuvor ermittelten Untergrundparameter sowie die haustechnischen Randbedingungen betrachtet und standortspezifisch optimiert. Um einen konservativen Ansatz für die Dimensionierungen zu verfolgen wird eine laminare Durchströmung der Sonden von 0,45 l/s angenommen.

Für die Simulationsrechnungen sind neben dem Design der Bohrung (Bohrlochdurchmesser, Wärmeleitfähigkeit Hinterfüllmaterial u.a.) vor allem die einzuhaltenden Grenztemperaturen des Sondenfluids entscheidend. Diese werden im genutzten Simulationsprogramm als Mittelung zwischen Vor- und Rücklauf bei einer Spreizung von 3 K berechnet. Als Grenztemperatur im Grundlastfall wird in Anlehnung an die Angaben der VDI 4640-2 eine minimale Sondenfluidtemperatur im Sondenvorlauf von 0 °C angesetzt. Daher ergibt sich als Grenztemperatur eine Sondenfluidmitteltemperatur von 1,5 °C im Programm.

Als Grenztemperatur im Spitzenlastfall gilt die Vorgabe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), wonach im 50. Betriebsjahr ein Absinken der Fluidmitteltemperatur (Mittelung aus Vor- und Rücklauf) unter -1,5 °C zu verhindern ist.

8.6.3 Dimensionierungsergebnisse

In Kapitel 8.1.3 wird der Heizenergiebedarf für das Beispielgebiet beschrieben. Dabei wird eine monovalente Variante mit 576 MWh/a sowie eine bivalente Variante mit 401 MWh/a geothermischer Energie zur Wärmeerzeugung in Betracht gezogen. Für die Berechnungen reduzieren sich diese Werte, aufgrund der Gleichzeitigkeit der Gebäude, auf 518 MWh/a im monovalenten Betrieb und 375 MWh/a im bivalenten Betrieb. Die angegebene Wärmemenge der Geothermie wird erdseitig, d.h. ohne WP, angegeben.

Es wurden mehrere Berechnungen zur geothermischen Anlage durchgeführt, wobei Simulationsrandbedingungen wie Bohrtiefe, Sondenabstand, Sondenanzahl und Sondentypen in mehreren Schritten variiert wurden, um die Varianten zur energetischen Versorgung zu optimieren. In der folgenden Tabelle 18 wurden die ausgewählten Varianten zur Abdeckung des Heizbedarfs für das Beispielgebiet Rückert Campus dargestellt.

Die Varianten 1 und 4 betrachten die benötigten Gesamtbohrmeter für ein oberflächennahes geothermisches System für eine monovalente bzw. bivalente Energieversorgung. In den Varianten 2 und 5 wurde eine 50 %-ige Regeneration des Sondenfeldes betrachtet. Durch das aktive Eintragen von Energie in den Sommermonaten wird die Temperatur im Untergrund erhöht, sodass diese im darauffolgenden Winter wieder entnommen werden kann. Der Untergrund fungiert demnach als eine Art Speicher. Die Auswirkung der Regeneration wird im Vergleich der Gesamtbohrmeter deutlich und zeigt damit auch Auswirkungen auf die Kosten der geothermischen Anlage. In Variante 3 werden tiefe Erdwärmesonden mit einer Bohrtiefe von 400 m betrachtet. Im weiteren Projektverlauf wird die Variante 5 als Vorzugsvariante betrachtet.

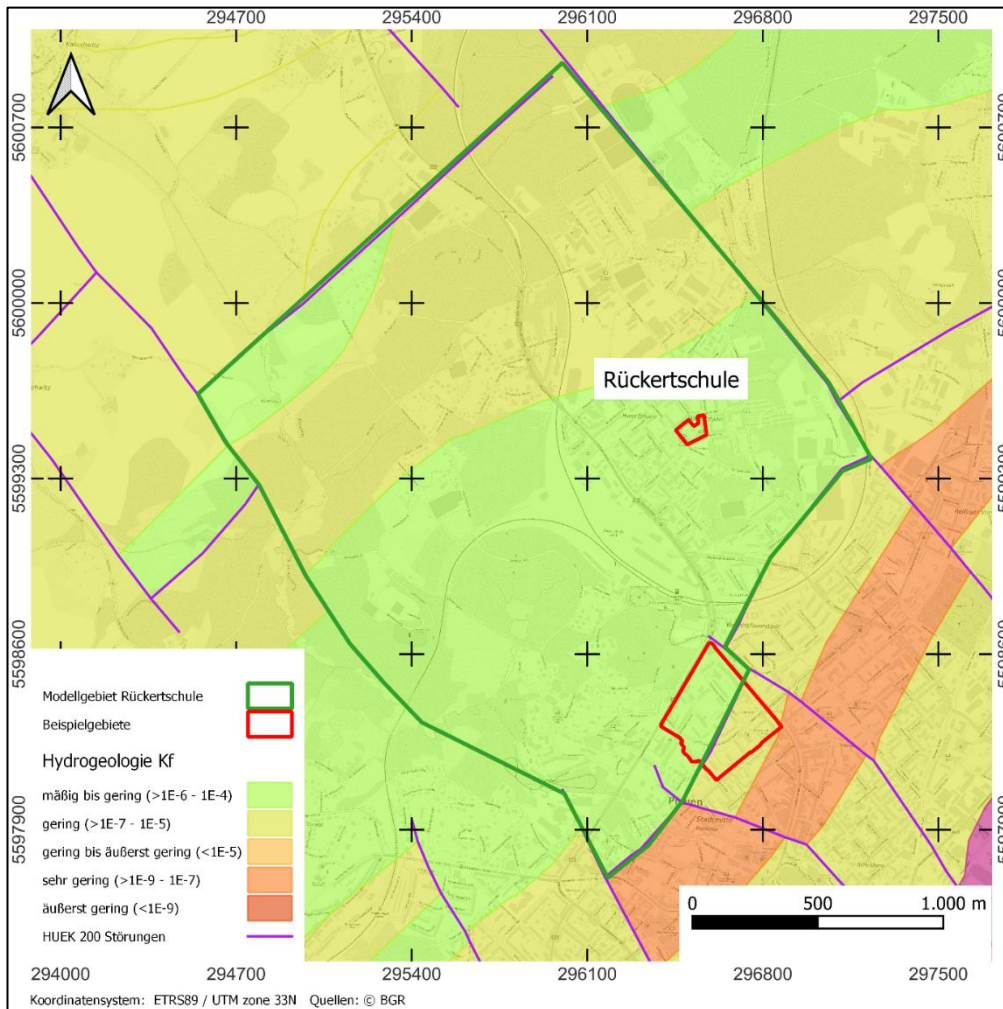
Tabelle 18: Varianten der geothermischen Dimensionierung des Beispielgebietes Rückert Campus.

		Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5
	Einheit	monovalente Energieversorgung			bivalente Energieversorgung	
Entzugsenergie	MWh/a	518	518	518	361	361
Eintragsenergie	MWh/a	0	259	0	0	180,5
Bohrtiefe	m	345	250	400	246	152
Sondenanzahl		45	40	36	48	48
Sondenabstand	m	10	8	10	8	8
Sondentyp		40 x 4,5	40 x 3,7	50 x 5,6	40 x 3,7	40 x 3,7
		Einfach U	Doppel U	Einfach U	Doppel U	Doppel U
Gesamtbohrmeter	m	15.525	10.000	14.400	11.808	7.296

8.6.4 3D-Thermohydrodynamische Modellierung

Zur Abbildung der thermischen Auswirkungen der Anlagen auf den Untergrund bzw. die Nachbarschaft, wurde zunächst für das Quartier Rückert Campus eine 3D-thermohydrodynamische Modellierung mittels der Software FEFLOW (© DHI-WASY) durchgeführt. Um die maximale Ausbreitung einer Temperaturfahne für die bivalente Energieversorgung am Standort zu erhalten, wurde die Variante 4 aus den EED-Berechnungen umgesetzt. Weitere Berechnungen zur thermischen nachbarschaftlichen Beeinflussung und dem Einfluss verschiedener geologischer und hydrogeologischer Einflussfaktoren sind in Kapitel 11 dargestellt.

In Variante 4 decken 48 Sonden mit einer Tiefe von 246 m einen Heizwärmebedarf von 361 MWh/a ab. Grundlage bildet das geologische 3D-Modell des Untergrundes, welches im Rahmen des Forschungsprojektes GeoPLASMA-CE erstellt wurde. Entlang der ausgewiesenen Störungen in der HUEK200 wurde ein Modellgebiet mit einer Größe von ca. 4,5 km² abgesteckt (siehe Abbildung 86). Die Störungen fungieren demnach als hydrologische Grenzen, welche eine Grundwasserfließrichtung im Zersatzbereich sowie im zerklüfteten Gestein des Diabases nach Südosten, zur Weißen Elster, beschreiben.



Quelle: BGR, 2013b

Abbildung 86: Abgrenzung des Modellgebietes Rückert Campus.

Das 3D-Modell besteht aus 3 Modelleinheiten (Tabelle 19). Denen werden hydrogeologische und geothermische Eigenschaften zugeordnet (Tabelle 20). Die zweite Modelleinheit beschreibt den Zersatzbereich des Diabases. Für diesen Bereich wird eine vergleichsweise höhere Permeabilität angesetzt. Im Grundgebirge fließt das Grundwasser in Klüften. Da genaue Werte zur Kluftdurchlässigkeit jedoch nicht vorliegen, kann dieser Parameter nicht in FEFLOW umgesetzt werden. Anhand der Angaben für die effektive Wärmeleitfähigkeit und die effektive vol. Wärmekapazität in Tabelle 20 lassen sich über die Schichtmächtigkeiten gemittelte Werte ableiten. Für die Simulation wird ein konservativer und hinreichend genauer Modellansatz gewählt, bei dem die ungestörte Untergrundtemperatur von 11,8 °C bis

zur Geländeoberfläche extrapoliert wird. Die thermischen Parameter und Randbedingungen stimmen mit den Angaben in der EED-Dimensionierung überein.

Tabelle 19: Stratigraphische und lithologische Gliederung des Modells Rückert Campus und zugeordnete Modellkörper.

Schichtname Geo-PLASMA-CE	Petrografie	Mächtigkeit an Sonde [m]	Modelleinheit
Anthropogene Auffüllungen	Aufschüttung	4	1
Schuppenzone	Diabaskonglomerat	6	2
	Diabas	239	3

Tabelle 20: Hydrogeologische und geothermische Eigenschaften der Modelleinheiten für das Modell Rückert Campus.

Petrografie	hydrogeologische Eigenschaften			thermische Eigenschaften	
	hydraulische Einheit	kf-Wert (horizontal) [m/s]	nutzbare Porosität	Wärmeleitfähigkeit [W/m·K] (eff.)	vol. Wärmekapazität [MJ/m ³ ·K] (eff.)
Anthropogene Auffüllungen	GGL	1,0E-05	0,10	1,0	2,2
Diabaskonglomerat	Kluft-GWL	1,0E-05	0,10	2,1	2,5
Diabas	Kluft-GWL	1,0E-07	0,05	1,9	2,5

Das 3D-Modell und die Einteilung in 3 Modelleinheiten sind Abbildung 87 zu entnehmen. Ebenso wird ersichtlich, dass im Bereich der Sonden für die Rechengenauigkeit eine feinere Diskretisierung der Vermaschung umgesetzt wurde. Dabei wurden die Vorgaben des Softwareherstellers DHI-Wasy beachtet. Das 3D-Modell erstreckt sich vertikal über insgesamt 309 m. Die drei Modelleinheiten werden aus rechen-technischen Gründen im Modell weiter unterteilt, um geringere Mächtigkeiten zu erhalten. Somit können Übergänge zwischen den unterschiedlichen hydraulischen und thermischen Parametern besser abgebildet und numerische Stabilität gewährleistet werden.

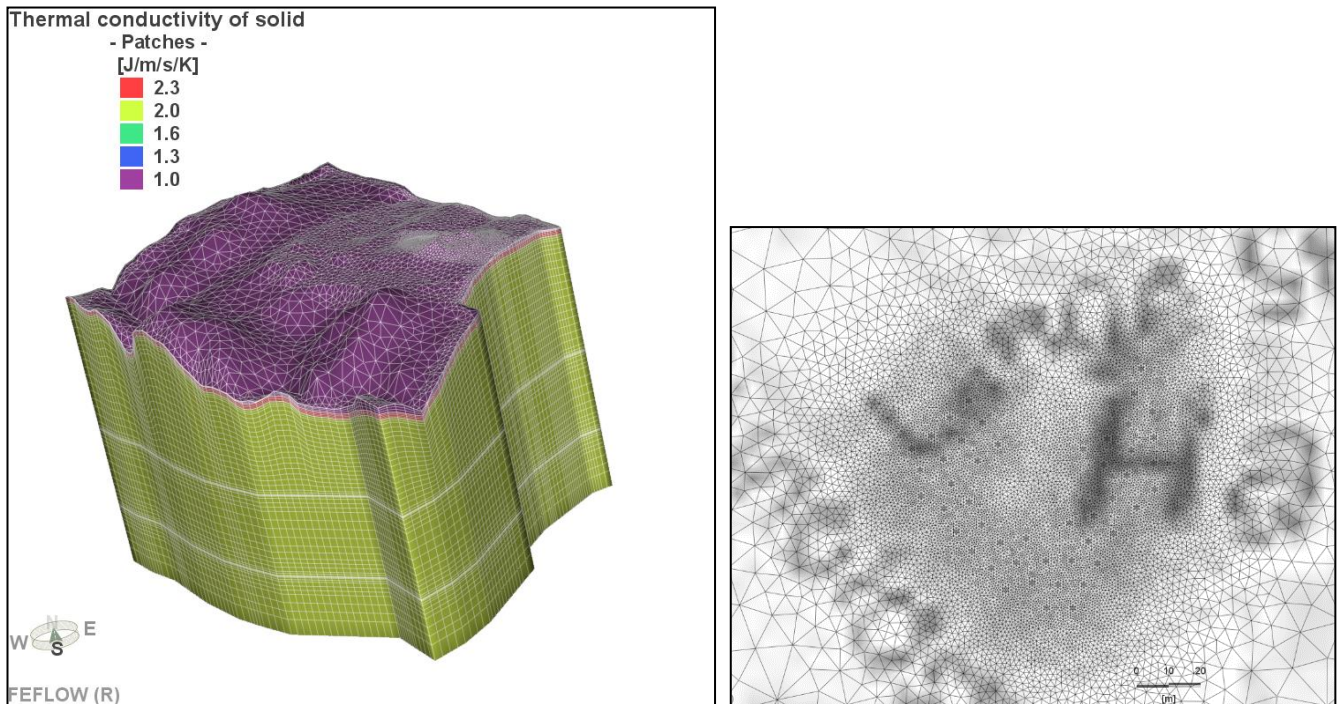


Abbildung 87: 3D-Modell des Untersuchungsgebietes mit Darstellung der Modell-Layer (links) sowie der Vermaschung im Sondennahbereich (rechts).

Aufgrund des heizlastigen Energiebedarfs findet generell eine Abkühlung des Untergrundes statt. In Abbildung 88 ist die Ausbreitung der Temperaturfahne in Form von Isolinien der Temperaturdifferenz nach 50 Betriebsjahren zu sehen. Es wird die Temperaturabnahme gegenüber der ungestörten Untergrundtemperatur von $11,8\text{ °C}$, ohne Grundwasserströmung dargestellt. Demnach breitet sich die Temperatur radial um das Sondenfeld aus. Im vorliegenden Fall geht die thermische Beeinflussung über die Grundstücksgrenzen hinaus und nachbarschaftliche Grundstücke werden thermisch beeinträchtigt. Die maximale Ausdehnung der Temperaturfahne (1 K-Isolinie) beträgt ca. 170 m. Die dargestellte laterale Temperaturentwicklung lässt sich auf die gesamte Sondentiefe übertragen (siehe Abbildung 89), da sich die geothermischen Parameter nicht ändern. Einen großen Einfluss weisen die spezifischen geologischen und hydrogeologischen Bedingungen für den Raum Plauen auf. Durch den heizlastigen Betrieb wird dem Untergrund Wärme entzogen. Um die Temperaturfahne zu reduzieren kann Wärme durch Kühlbedarf oder Regeneration dem Untergrund wieder zugeführt werden. Aus diesem Grund kann die Variante 5 mit 50 %-iger Regeneration des Untergrundes empfohlen werden.

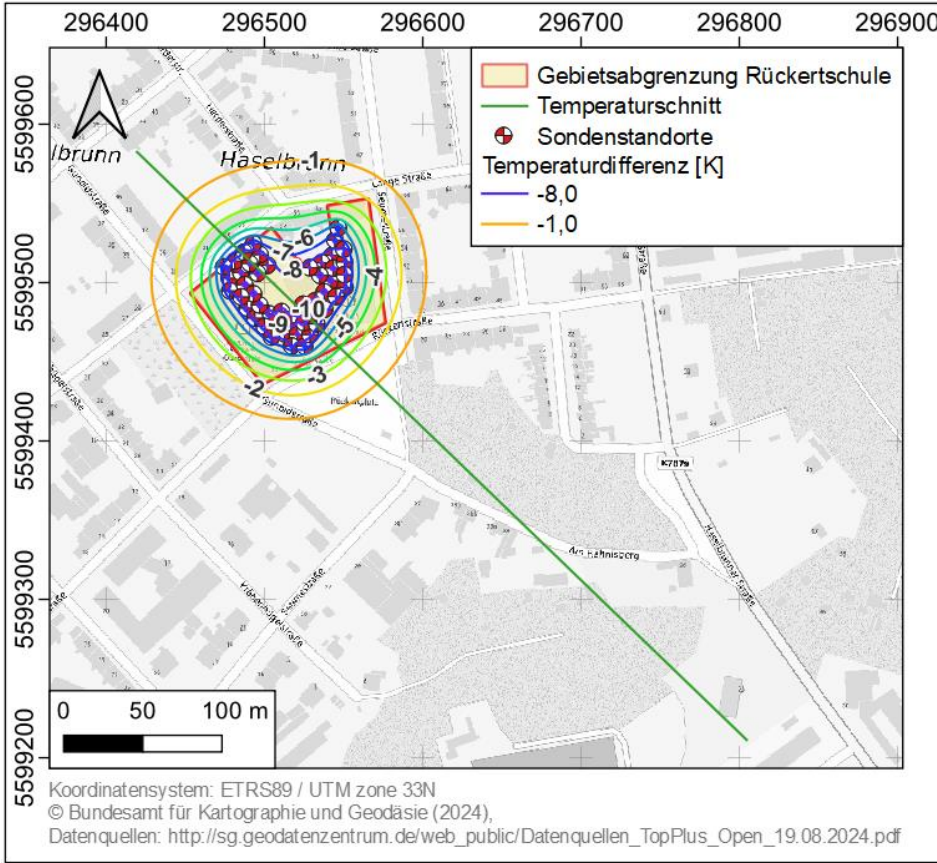


Abbildung 88: Isolinien der Temperaturdifferenz im 50. Betriebsjahr für das Modell Rückert Campus.

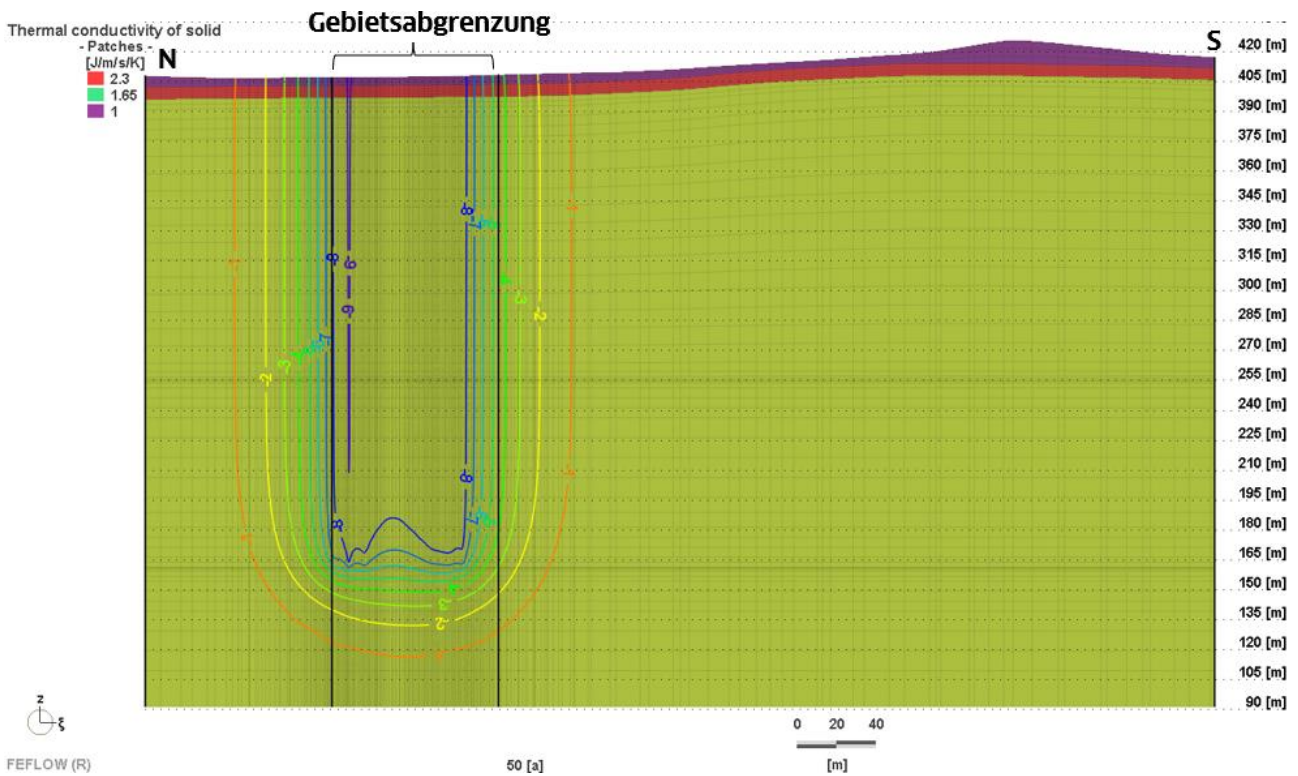


Abbildung 89: Temperaturschnitt durch das Sondenfeld (Modell Rückert Campus).

8.7 Technische Dimensionierung

Als Vorzugsvariante wird die Variante I mit 65 % EE und zentraler Versorgung und einer Regeneration von 100 % betrachtet. Die hohen Wärmelasten werden weiter durch Gas gedeckt. Die Grundlast soll durch die Geothermie mittels WP bereitgestellt werden. Die Investitionskosten für WP und Geothermie-Sonden bleiben, aufgrund der Auslegung auf Grundlastdeckung und Dimensionierung auf 30% der Leistung, gering. Die Wärmeversorgung der Grundschule erfolgt derzeit mit 4 x 100 kW Brennwert-Wandkesseln (siehe Abbildung 90), welche über die summierte Heizlast (ca. 390 kW) der drei Gebäude auf dem Rückert-Campus ausgelegt sind. Zusätzlich verfügt die Oberschule über eigene Gaskessel. Diese Überdimensionierung der gasbetriebenen Erzeuger ermöglicht einen Rückbau von ca. zwei Gaskesseln in der Erzeugerzentrale der Grundschule. Somit kann Bauraum für das Einbringen von WP generiert werden. Der 800 Liter große ZEEH-Speicher sollte für den optimalen Betrieb der Erzeuger um ca. 2 m³ erweitert werden.

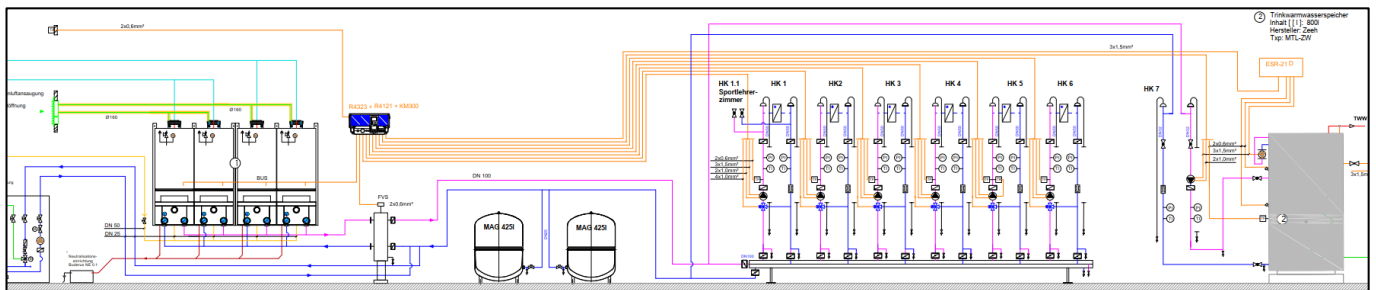


Abbildung 90: Anlagenschema Wärmeversorgung Bestand Rückert Grundschule

Die geplante zentrale Versorgung aller Gebäude aus der Grundschule heraus kann, bei angepasster Regelung, die Erzeugereffizienz durch die aufkommenden Gleichzeitigkeiten erhöhen. Zusätzlich liegen die Erzeugerleistungen redundant an, sobald die drei Gebäude miteinander verbunden sind.

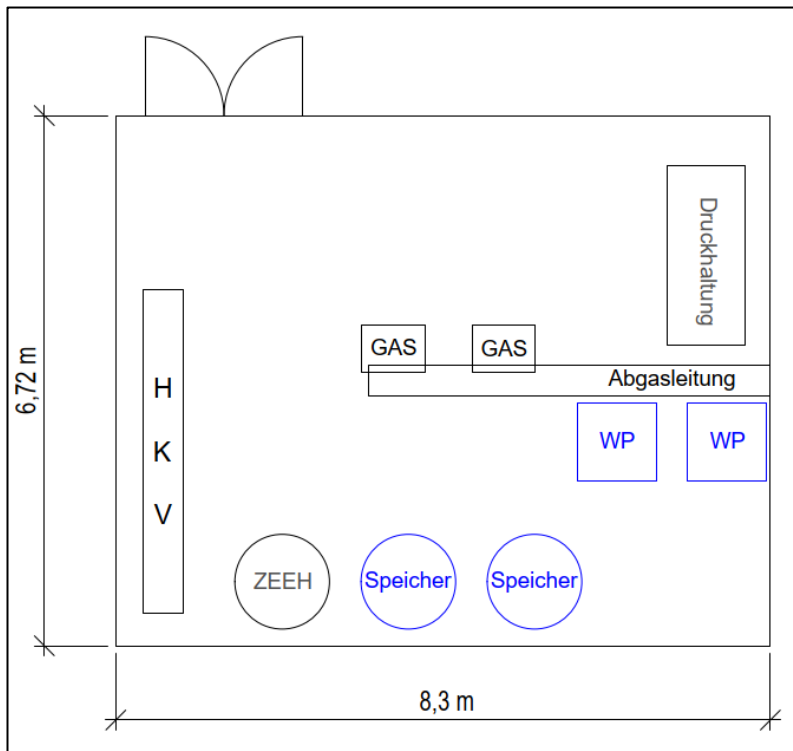


Abbildung 91: Skizze Aufstellplan Heizraum Rückert Grundschule

Die Abbildung 91 zeigt eine mögliche Anordnung der Geräte im Heizraum (Darstellung Bestand: schwarz, Darstellung neue Bauteile: blau). Hinzukommen zwei Sole-Wasser-WP mit zwei Speichern. Für eine höhere Ausfallsicherheit sowie zur Gewährleistung der Einbringbarkeit werden im Konzept zwei dieser WP mit den folgenden Abmaßen vorgesehen:

- Höhe: 1.740 mm
- Breite: 900 mm
- Tiefe: 848 mm
- Gewicht: 500 kg
- 2x ca. 59 kW (B0/W35).

Die mögliche Wärmeleistung der WP wird durch die Quelltemperatur und die zu erreichende Heiz-Vorlauftemperatur bestimmt. Die Art der Einbringung ist zu prüfen. Sollte die Aufstellfläche in der Grundschule für die zusätzlichen Speicher nicht genügen, können diese optional auch in der Oberschule (siehe Abbildung 92) platziert werden.

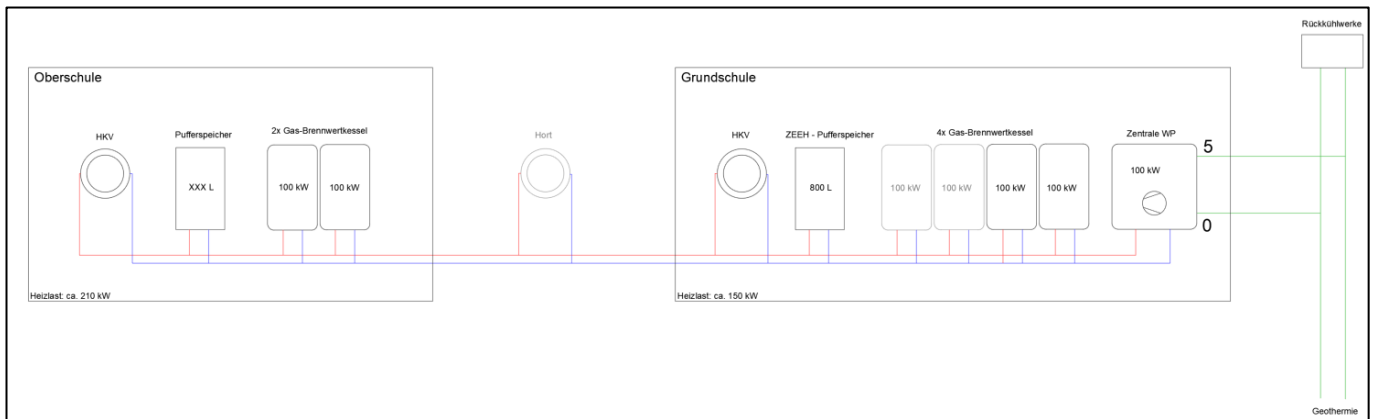


Abbildung 92: Anlagenschema Optimierte Wärmeversorgung Rückert Grundschule

Im Anlagenschema (Abbildung 92) ist der Rückbau von zwei Bestands-Gaskesseln grau dargestellt. Die zwei geplanten WP sind vereinfacht als ein Gerät dargestellt. Die WP werden über Soleleitungen mit den Geothermie-Sonden, sowie den Rückkühlern verbunden (siehe Anhang A 2.1).

8.7.1 Rückkühler

Die Rückkühler sollten auf eine Leistung von ca. 385 kW für den gesamten Campus (bei 27 °C Außentemperatur) ausgelegt werden, um im Jahresverlauf die 100 %-ige Regenerationsquote zu erreichen. Die übertragbare Leistung ist ebenfalls stark abhängig von Soletemperatur und Vorlauftemperatur.

Mittels einer Überdimensionierung der Rückkühler bzw. deren Übertragungsflächen kann die Lüfterdrehzahl und somit die Schalleistung verringert werden. Ein Beispiel-Gerät der berechneten Leistung hat folgende Abmaße:

- Höhe: ca. 2 m
- Breite: ca. 1,5 m
- Länge: ca. 5 m
- Gewicht: ca. 1.000 kg.

In reinen Wohngebieten werden die Schallimmissionswerte am Fenster schutzwürdiger Räume, bzw. dort wo diese errichtet werden können durch die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) auf tags 50 dB(A) / nachts 35 dB(A) begrenzt. Um die Schallimmission auf Gebäude zu minimieren wurden zwei Aufstellorte für Rückkühler (Abbildung 93) untersucht.



Quelle: GEOSN, 2023b

Abbildung 93: Mögliche Aufstellorte für Rückkühler auf dem Rückert Campus

Auf eine Rückkühler-Verortung nördlich des Hortgebäudes wurde verzichtet, um einen möglichst großen Abstand zur Wohnbebauung zu gewährleisten. Die Rückkühler sollten mittels geeigneten Maßnahmen so angeordnet werden, dass ihre Schallausbreitungs-Kegel die umliegenden Gebäude nicht tangieren. Die Leitungslängen zur möglichen Energiezentrale im Keller der Grundschule sollten so kurz wie möglich gehalten werden. Die Sondenregeneration sollte möglichst außerhalb des Schulbetriebs und wenn, dann im schallreduzierten Betrieb erfolgen. Die Schallemission sollten sich möglichst Richtung Rückertplatz ausbreiten. Aus diesem Grund wird Aufstellplatz 2 bevorzugt.

8.7.2 PV-Anlage

In der Potenzialermittlung wurde die maximal installierbare Anlagengröße auf ca. 130 kWp (100%) berechnet. Die Werte für Netzeinspeisung und Eigendeckungsbetrag wurden simuliert und zusammen mit

den Investitionskosten, und Betriebskosten in die Wirtschaftlichkeitsberechnung überführt. Diese wurde für verschiedene Größen der PV-Anlagen berechnet, um über den Betrachtungszeitraum die niedrigsten Gesamtkosten (Abbildung 94) ausmachen zu können.

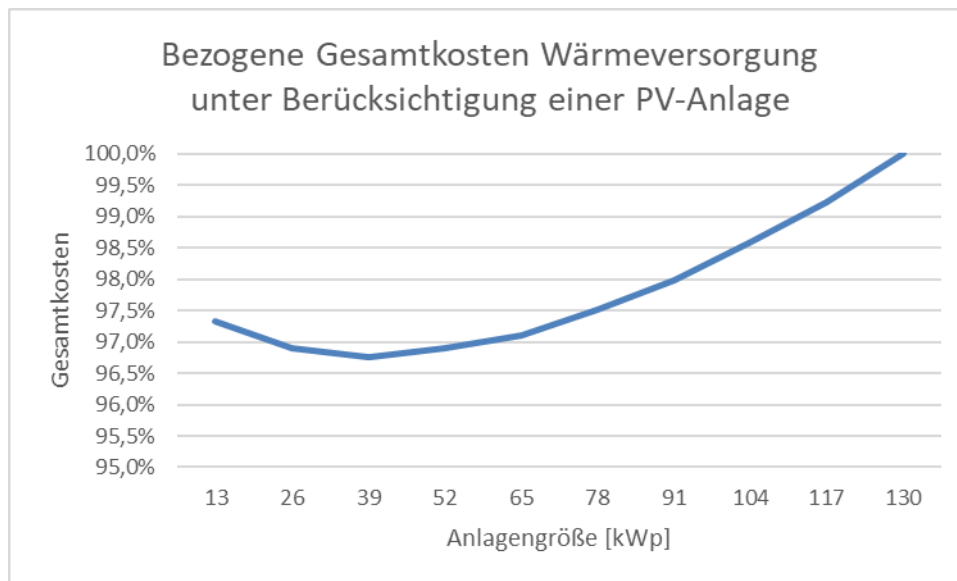


Abbildung 94: Optimierung der Größe der PV-Anlage auf Gesamtkosten

Die Investitions- und Betriebskosten erreichen ihr Minimum über den Betrachtungszeitraum, wenn eine PV-Anlage mit ca. 50 kWp installiert wird. In der Simulation der Wärmeerzeugung mit WP, Rückkühlern und Umwälzpumpen für Heizung und Sole sind jedoch die Allgemeinstromverbräuche für Beleuchtung und Geräte in den Schulen nicht berücksichtigt. In der Wirtschaftlichkeitsberechnung der folgenden Kapitel wird daher die Anlagengröße auf 70 kWp über dem simulierten Optimum angenommen. Der Einfluss der PV-Anlage auf die Gesamtkosten beträgt in Abhängigkeit ihrer Größe ca. 3,5 %. Mit einer Berücksichtigung des Allgemeinstromverbrauchs, niedrigeren Zinsen und einem höheren Strompreis würde dieser Einfluss steigen.

8.8 Energiebilanz

Die Ergebnisse der Jahreslastgang-Simulation des Rückert-Campus sind im Energieflussschema in der Abbildung 95 dargestellt. Die Simulation wurde auf Stundenbasis durchgeführt. Die Bedarfslastgänge wurden wie in Kapitel 8.1.3 erläutert aufgestellt.

Die von allen Gebäuden am Rückertcampus benötigte Wärmemenge beträgt etwa 750 MWh. Die WP-Anlagen könnten einen Anteil von ca. 530 MWh und die Gaskessel von ca. 220 MWh leisten. Der WP-Anteil beträgt dann 70 %.

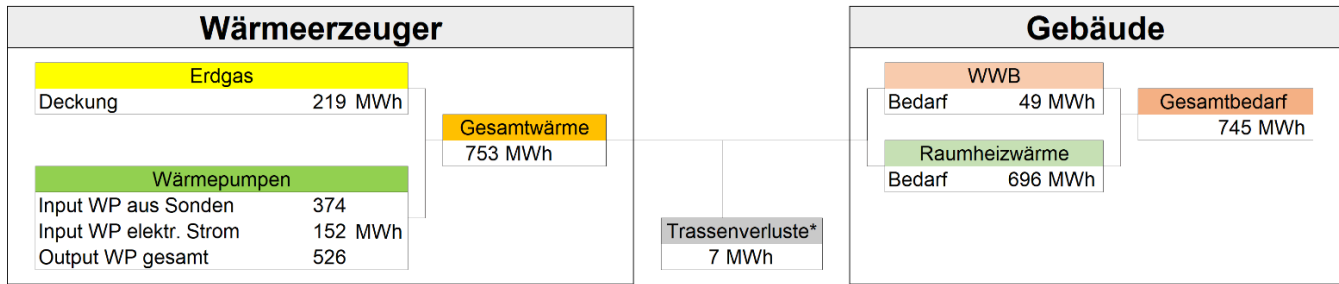


Abbildung 95: Rückert Campus: Energieflussschema (Ergebnisse der Simulation)

8.9 Investitionskosten

In der Abbildung 96 sind die Investitionskosten der Vorzugsvariante in netto dargestellt. Die Investitionssumme ohne Berücksichtigung von Förderung beträgt ca. 1.200.000 €. Den Hauptanteil nehmen die geothermischen Erdwärmesondenanlagen mit ca. 580.000 € ein. Die PV-Anlagen, die WP sowie die dafür benötigte Elektro- und Hydraulikinstallation bilden einen ähnlich hohen Anteil. In der Kostenschätzung für das Wärmenetz wird von einem kompletten Neubau ausgegangen. Es sind der Rohrleitungsbau, inkl. Tiefbaukosten in Form von Erdaushub- und Verfüllungskosten enthalten.

Die Kosten für Geothermie enthält u.a. die Herstellung der EWS, die Herstellung von Verteilerschächten und Anbindeleitungen inkl. Tiefbau. Unter Berücksichtigung der BEG-Förderung (siehe Kapitel 7) besteht die Möglichkeit einer Grundförderung von 30 % der förderfähigen Kosten für einen Heizungstausch beim Einbau von Erneuerbaren Energien basierten Heizungen bzw. 50 % für die energetische Fachplanung eines Bestandsgebäudes in Form eines Investitionszuschusses.

Weitere Förderanteile im Rahmen von Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle und der Anlagentechnik können bei Einhaltung der Vorgaben in Höhe von bis zu 15-20 % geltend gemacht werden.

Investitionskosten		
Sole-Wärmepumpen (zentral)	70.000	€
Pufferspeicher	5.000	€
WP-Erzeuger-Hydraulik	10.000	€
WP-Quelle-Hydraulik	225.000	€
HK-Verteiler, inkl. RLB	5.000	€
Elektroinstallation Peripherie Hausanschluss	20.000	€
Geothermie-Sonden exkl. Anbindung	584.000	€
Druckhaltung	5.000	€
Monitoring / Messkonzept / Regelung	30.000	€
Photovoltaikanlage	105.000	€
Wandlermessung (PV + WP)	20.000	€
Rückkühler + hydr. Einbindung	50.000	€
Wärmetrasse	50.000	€
Tiefbau	10.000	€
Summe	1.179.000	€

Abbildung 96: Investitionskosten Wärmeversorgung Rückert Campus

8.10 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung der Wärmeversorgung erfolgt anhand einer dynamischen Investitionsrechnung nach der Kapitalwertmethode. Cashflows der Zukunft werden dafür abgezinst. Die Annahmen der beeinflussenden Faktoren sind im Kapitel 6.1.4 beschrieben.

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird über eine Dauer von 20 Jahren vorgenommen.

Die Investitionskosten wurden im vorangegangenen Kapitel erläutert. Die Betriebskosten setzen sich zusammen aus den Bezügen für Strom (ca. 38.000 €) und Erdgas (ca. 29.000 €) sowie Kosten für Wartung und Instandhaltung der Anlagen (ca. 6.500 €).

In Summe betragen die Betriebskosten berechnet für das erste Jahr ca. 75.000 €.

Die Wärmegestehungskosten belaufen sich über einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren auf ca. 15,5 Ct/kWh. Eine detaillierte Auflistung der Berechnung befindet sich in Anhang A 2.2.

Jährliche Kosten		
Netzbezug Strom	37.835	€/a
Einspeisevergütung	1.494	€/a
Gas	29.246	€/a
Betriebsgebundene Kosten Sondenfeld (0,3%)	1.752	€/a
Betriebsgebundene Kosten Erzeuger (2,5%)	4.250	€/a
Betriebsgebundene Kosten PV-Anlage (0,5%)	525	€/a
Summe Betriebskosten (netto)	75.102	€/a
Wirtschaftlichkeit		
Gesamtkosten über 20 Jahre	2.330.704	€
Wärmegestehungskosten **	15,5	ct/kWh (netto)
** ohne Ertüchtigung Gebäude / im Betrachtungszeitraum		

Abbildung 97: Betriebskosten Wärmeerzeugung Rückert Campus

8.11 Fazit Beispielquartier Rückert Campus

Im Rahmen der Studie wurde für die 3 Gebäude (Grundschule, Oberschule, Hortgebäude) am Rückert Campus ein Wärmekonzept erstellt. Alle Gebäude werden aktuell mittels Erdgas mit Wärme versorgt. Die Oberschule und der Hort verfügen dabei über Heizkörper und sind teilsaniert. Die Grundschule erhielt bereits eine Sanierung der Fassade, der Fenster, sowie Fußbodenheizungen in den Turnhallen und eine Warmwasserbereitung. Um der Teilsanierung und der daraus resultierenden Anforderung an nur gering zu senkende Vorlauftemperaturen gerecht zu werden, bietet es sich an, die Gaskessel im Bestand zum Teil beizubehalten. Das WP-System wird vorgesehen, um ganzjährig die Grundlast zu decken und somit ca. 70% des Wärmebedarfs. Die Gaskessel stehen für hohe Vorlauftemperaturen und Spitzenlasten bei tiefen Außentemperaturen zur Verfügung. Die Erdwärmesonden als größter Investitionskostenfaktor können geringer dimensioniert werden, wenn ein Rückkühler die Luftwärme bei hohen Außentemperaturen in die Erde transferiert, um sie dort für die Heizperiode zu speichern (Variante 5). Im Sommer könnte dieser auch als Wärmequelle für die WP dienen. Die Aufstellung, für eine möglichst geringe Schallimmission auf die Gebäude, bietet sich im Süden des Campus an.

Eine PV-Anlage mit ca. 70 kWp soll die Strombedarfe der Wärmeerzeugungssysteme und für Allgmeinstrom zum Teil decken und senkt die Gesamtkosten des Systems über den Betrachtungszeitraum. In der Heizzentrale im Keller der Grundschule könnten Bestands-Gaskessel deinstalliert werden um Platz für ein Wärmepumpensystem mit ca. 100 kW Heizleistung zu schaffen. Die Überdimensionierung der Gaskessel (Summe 600 kW) bezogen auf die Heizlast lässt zusätzlich genug Spielraum für eine redundante Auslegung im Falle einer Versorgung des gesamten Campus aus einem Heizraum (Grundschule). Eine Wärmetrasse unter dem Schulhof könnte die Gebäude miteinander verbinden. Die Gesamtinvestitionskosten (ca. 1.200.000 €) werden somit gering gehalten, da nur ein WP-System mit der benötigten elektrischen und hydraulischen Peripherie installiert werden muss. Zusätzlich könnte ein Schulgebäude das andere mitversorgen (Redundanz).

9 Geothermische Machbarkeitsstudie am Beispielquartier Bahnhofsvorstadt

9.1 Gebäudeanalyse

9.1.1 Datengrundlage

Zur Erzeugung von Bedarfslastgängen in einem Untersuchungsgebiet werden Wärmeverbrauchszeichnungen, bestenfalls je Stunde über ein gesamtes Jahr benötigt. Liegen keine stündlichen Aufzeichnungen vor, können Monats- oder Jahressummen zu Hilfe genommen werden. Aufgrund der Größe der betrachteten Bahnhofsvorstadt liegt eine unterschiedliche Datengüte für die verschiedenen Gebäude vor. Teilweise sind keine Messwerte vorhanden.

Zur Ermittlung der Heizlasten und der Jahressummen (Wärmebedarf) des gesamten Quartiers werden die Verbrauchsmessdaten der Jahre 2018-2022 verwendet. Diese wurden durch die EnviaTherm (Fernwärmebetreiber) bereitgestellt. Fehlende Verbrauchsmessdaten werden durch Schätzungen des THERMOS-Tools ergänzt (Abbildung 98).

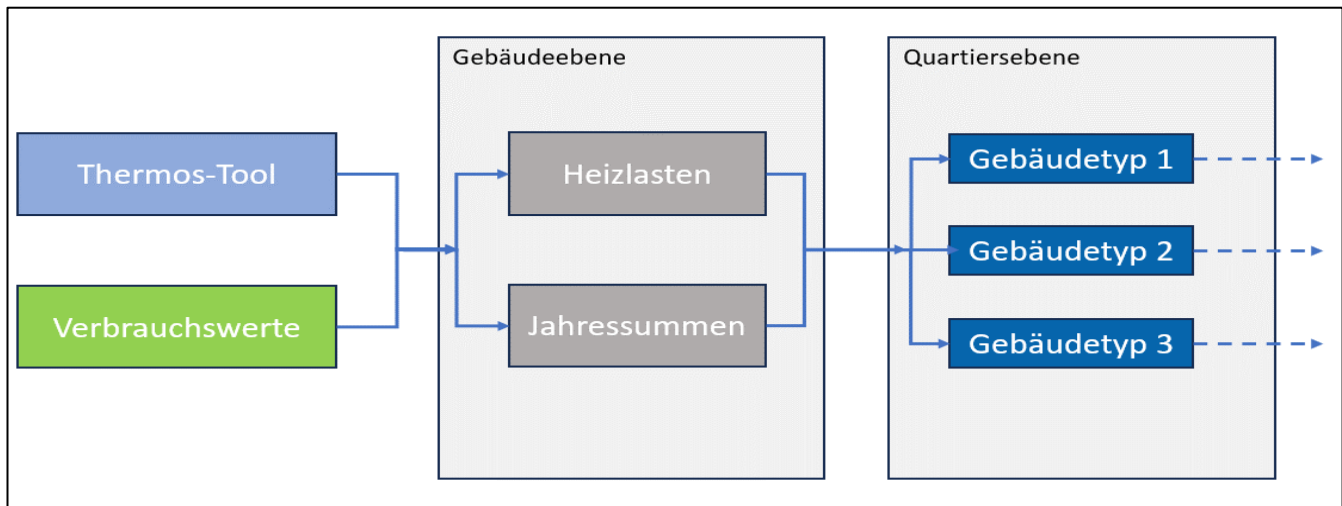


Abbildung 98: Erzeugung der Datengrundlage und Einteilung in Gebäudetypen

Es werden gebäudescharf separat Wärmeverbrauchswerte (Jahresmenge in MWh/a) und Spitzenwärmebedarfe in kW aufgeführt. Des Weiteren werden die Art der Nutzung und Informationen (sofern vorhanden) zur bestehenden Warmwasserbereitung aufgelistet.

THERMOS-Tool als Ersatz für fehlende Verbrauchsmesswerte

Die Verbrauchsmessdaten über das Quartier sind nur inkonsistent verfügbar. Die fehlenden Werte werden mit einer Anwendung des THERMOS-Project geschätzt. Das open-source THERMOS-Tool ermöglicht die Berechnung von Wärme- und Kältebedarfen sowie Spitzenlasten.



Abbildung 99: Grafische Oberfläche des THERMOS-Tools

Die Abbildung 99 zeigt die grafische Oberfläche des THERMOS-Tools. Im Ergebnis sind hier die Wärmebedarfe der Gebäude als Heat-Map dargestellt. THERMOS verwendet Gebäudedatenbanken, die Gebäudetyp, Isolierungsniveau, Baujahr, Größe und andere Informationen enthalten. Zusätzlich werden Klimadaten des Standortes einbezogen. Unter Umständen kann auch das Nutzerverhalten für innere Lasten berücksichtigt werden.

9.1.2 Gebäude-Clusterung

Nach der Datenaufnahme wird eine Gebäude-Clusterung vorgenommen. Hintergrund ist das Ziel, durch eine Unterteilung der Bedarfsstruktur zum einen eine genauere Abschätzung des Gesamtwärmebedarfs-Lastganges vornehmen zu können und zum anderen der Versuch auf erforderliche Betriebsparameter der Wärmeversorgung schließen zu können.

Als erstes wird anhand der Nutzung unterschieden. Es wird in Wohnen (W), Gewerbe (G) und öffentliche Gebäude (Ö) je Gebiet unterteilt. In der Tabelle 21 ist der IST-Heizwärmebedarf aufgelistet. Bei Anschlussstellen mit zentraler Warmwasserbereitung wurden pauschal 20 kWh je Quadratmeter Energiebezugsfläche und Jahr von den Verbrauchswerten abgezogen.

Tabelle 21: Heizwärmebedarf Bahnhofquartier

Nutzung	Wohnen (W)	Gewerbe (G)	Öffentliche (Ö)	Summe
Heizwärmebedarf [MWh/a]	4.696	717	1.126	6.539

Als zweites sollen anhand der erforderlichen Heizungs-Vorlauftemperatur (H-VL) die Gebäudetypen 1 bis 3 zugewiesen werden (Kapitel 5.3.3). In der Bahnhofsvorstadt werden sehr viele Gebäude bisher mittels Fernwärme und Temperaturen von mehr als 60 °C beheizt. Die Erfahrung zeigt, dass im DDR-Plattenbau oft Heizkörper größer als erforderlich dimensioniert wurden und Gebäude mit deutlich niedrigerer Temperatur betrieben werden können, als in der Vergangenheit praktiziert. Für die Bahnhofsvorstadt liegen keine Angaben zu den erforderlichen H-VL vor. Aufgrund geringer Datenlage wird daher in Anlehnung an Kapitel 5.3.3 eine Unterteilung anhand der spezifischen Heizwärmebedarfe vorgenommen. Der spezifische Heizwärmebedarf von mehr als 80 kWh/(m²·a) soll als grobes Hilfsmittel zur Indikation von Gebäude dienen, die nicht niedertemperaturtauglich sind (Gebäudetyp 3). Des Weiteren werden Gebäude, die mittels Ein-Rohr-Heizsystem beheizt werden als Gebäudetyp 3 klassifiziert. Dies sind vier Gebäude im Gebiet Ost, Tischendorfer Straße der WbG und AWG. Unter den im Konzept getroffenen Annahmen ist der Umbau zu Zwei-Rohr-Systemen zur Nutzung von Geothermie erforderlich. Im Folgenden wird diese Sanierung als obligatorisch betrachtet.

Eine Unterteilung der Gebäude mit einem spezifischen Heizwärmebedarf von weniger als 80 kWh/(m²·a) in die Typen 1 und 2 (gemäß Kapitel 5.3.3) wird nicht vorgenommen, da keine Aussagen über die potenzielle Absenkbarkeit der H-VL unterhalb von 45 °C aus den vorhandenen Daten möglich ist und auch als gering vertreten abgeschätzt wird. Im Folgenden wird von der Sanierung der Gebäude des Gebäudetyp 3 zum Typ 1 oder 2 vorausgesetzt, da sonst keine Versorgung mit oberflächennaher Geothermie mittels WP zu empfehlen ist.

9.1.3 Definition von Sanierungsmaßnahmen

Die Niedertemperaturtauglichkeit eines Gebäudes kann erhöht werden, wenn die Heizlast gesenkt wird (siehe Kapitel 5.3.2) oder das Heizungssystem erneuert. In der Regel kann die erforderliche H-VL deutlich gesenkt werden, indem bereits in den Räumen die die höchste H-VL erfordern die Heizkörper ausgetauscht werden, sodass eine höhere Wärmeleistung abgegeben werden kann (siehe Kapitel 5.3.3). Wird angestrebt die Heizkörper mit einer kleineren Spreizung zu betreiben, um die Heizkörpermitteltemperatur zu erhöhen, kann es gegebenenfalls erforderlich sein eine Strangsanierung der Heizungsleitung durchzuführen, um höhere Volumenströme zu ermöglichen. In Gänze können folgende Maßnahmen zur Anhebung der Niedertemperaturtauglichkeit dienen:

- Ertüchtigung der thermischen Hülle,
- Austausch von Fenstern und Türen,

- Austausch/ Installation von raumlufttechnischen Anlagen mit Wärmerückgewinnung,
- Anpassung der Heizungstechnik,
- Absenkung der Heizkurve,
- Durchführung eines hydraulischen Abgleichs,
- Austausch von Pumpen und Stellventilen,
- Austausch/ Erweiterung von Heizflächen,
- Austausch/ Erweiterung von Rohrleitungssträngen,
- Umbau zentraler Warmwasserbereitungsanlagen.

An dieser Stelle ist keine detaillierte Analyse der Bestandsgebäude und Heizungssysteme vorgesehen. Folglich kann der tatsächlich erforderliche Sanierungsaufwand im Bahnhofsquartier nicht bemessen werden. Die generelle Machbarkeit der Sanierung der Gebäude hin zu einem Niedertemperaturtauglichkeitstyp 1 oder 2 wird als gegeben angenommen.

9.2 Potenzialanalyse Wärmequellen

9.2.1 Potenzialanalyse Geothermie

Die Situation im Beispiel Bahnhofsvorstadt ist der für den Rückert Campus beschriebenen Situation sehr ähnlich. Die Bahnhofsvorstadt ist zweifellos ein komplexeres Gebiet mit mehreren verschiedenen Wärmeabnehmern und einer Reihe von Freiflächen, die für oberflächennahe Geothermie genutzt werden können. Ein relativ großer Teil der Beispielfläche ist versiegelt oder dient als Teil einer Verkehrs- oder sonstigen Infrastruktur. So ist bereits aus den ersten Analysen ersichtlich, dass die freie Fläche im Verhältnis zum Wärmebedarf relativ klein sein wird. Der Einsatz von Erdwärmekollektoren und Erdwärmekörpern kann bei diesem Verhältnis aus Freifläche zu Energie grundsätzlich nicht empfohlen werden. Der Einsatz von Erdwärmesondenfeldern mit oberflächennahen oder tiefen Erdwärmesonden stellt dagegen eine gute Möglichkeit dar, den bestehenden Energiebedarf zu decken. Der städtebauliche Charakter des Beispielgebietes sowie die geringe geplante Bautätigkeit schließen den Einsatz von thermisch aktivierten Bauelementen und Energiepfählen ebenfalls aus.

Die hydrogeologische Situation lässt die Nutzung von Grundwasser nicht zu, aber aufgrund des möglichen Vorhandenseins von unterirdischen Kavernen ist es theoretisch möglich, die Wärme des Grubenwassers zu nutzen. Für eine qualifizierte Bewertung dieser Option müsste die Fließgeschwindigkeit und der Chemismus sowie die förderbare Menge des Grubenwassers detailliert überprüft werden. Da ein

Abpumpen von Grubenwasser in diesem Bereich nicht geplant ist, wäre diese Option mit einem hohen Kostenaufwand verbunden und kann daher im vorliegenden Konzept abschließend betrachtet werden.

Tabelle 22: Möglichkeiten zur Erdwärmenutzung für Bahnhofsvorstadt

Bahnhofsvorstadt	
Geschlossene Systeme	
Erdwärmekollektoren	nicht machbar
Erdwärmesondenfelder	machbar
Erdwärmekörbe	nicht machbar
thermisch aktive Bauteilsysteme	nicht machbar
Offene Systeme	
Grundwasserwärmepumpen	nicht machbar
Grubenwasser	nicht machbar
Tiefe Geothermie	
Tiefe EWS	machbar

9.2.2 Positionierung der Sonden am Standort

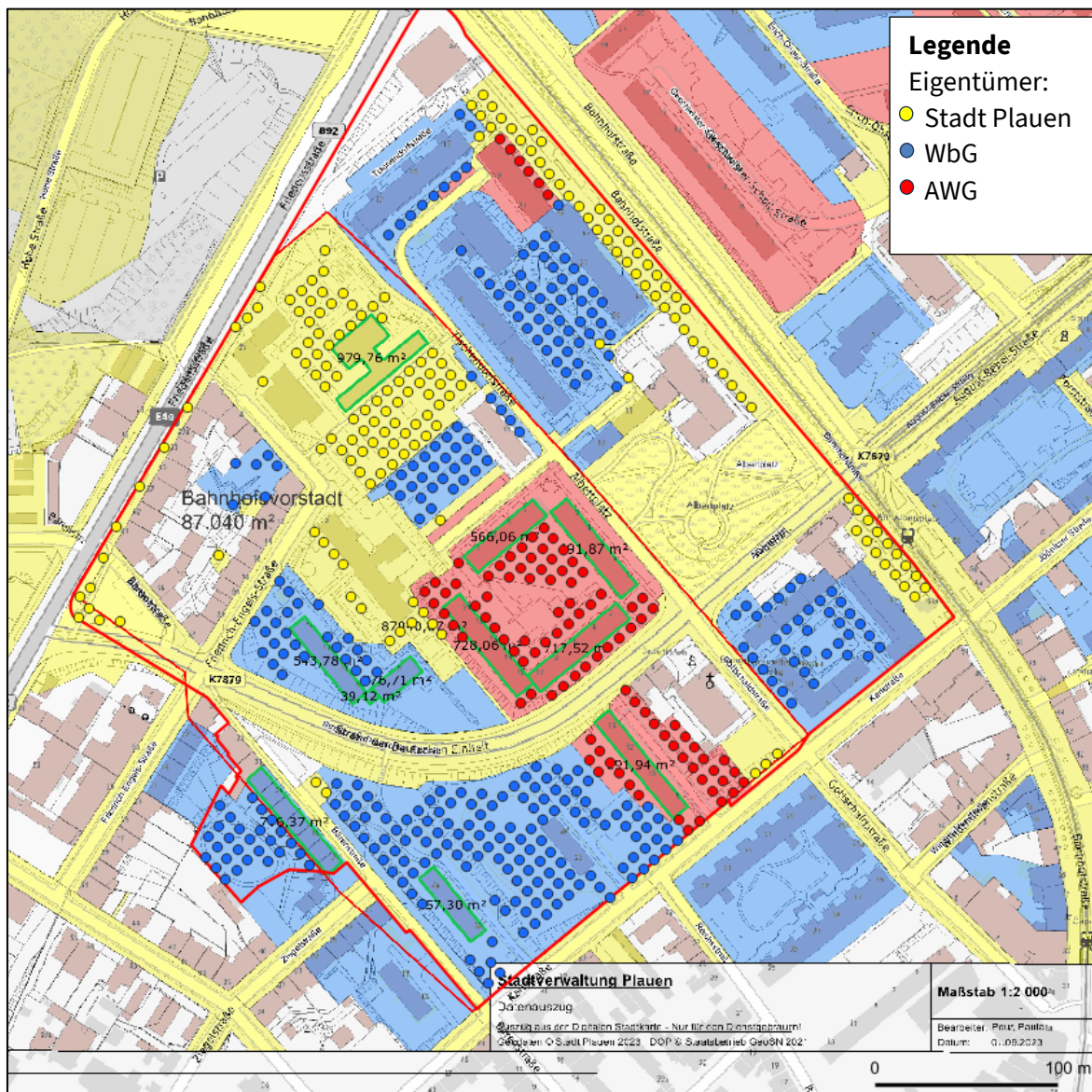
Im Beispielgebiet der Bahnhofsvorstadt wurde eine Freiflächenanalyse durchgeführt. Die freie Fläche wurde als geometrische Differenz zwischen der Fläche des Beispielgebiets und

- den Flächen der Gebäude nach dem LOD2-Modell mit einem 2 m breiten Puffer,
- den auf der Grundlage der Orthofotokarte definierten Flächen der Kommutterung,
- den aus der Jahresorthofotokarte definierten Baumkronenflächen und
- Flächen von Naturschutzgebieten (Park Albertplatz).

Die verbleibende freie Fläche wurde automatisch mit einem regelmäßigen Raster von Erdwärmesonden mit einem Abstand von 8 m ausgefüllt. Die Erdwärmesonden wurden dann entsprechend dem Eigentümer des Grundstücks, auf dem sie sich befinden, in 4 Kategorien eingeteilt (Abbildung 100):

- Stadt Plauen,
- WbG,
- AWG und
- sonstige Eigentümer.

Erdwärmesonden, die sich auf den Grundstücken anderer Eigentümer befinden, wurden aus technischen und rechtlichen Gründen ausgeschlossen. Dagegen wurde auf Anregung der Stadt Plauen der Bereich hinter den Reihenhäusern im westlichen Teil des Beispielgebietes in die Analyse aufgenommen (Abbildung 100). Insgesamt wurden im Beispielgebiet Bahnhofsvorstadt 593 Erdwärmesonden verortet. Die Tabelle gibt einen Überblick über den Anteil der Sonden auf den Grundstücken der verschiedenen Eigentümer.

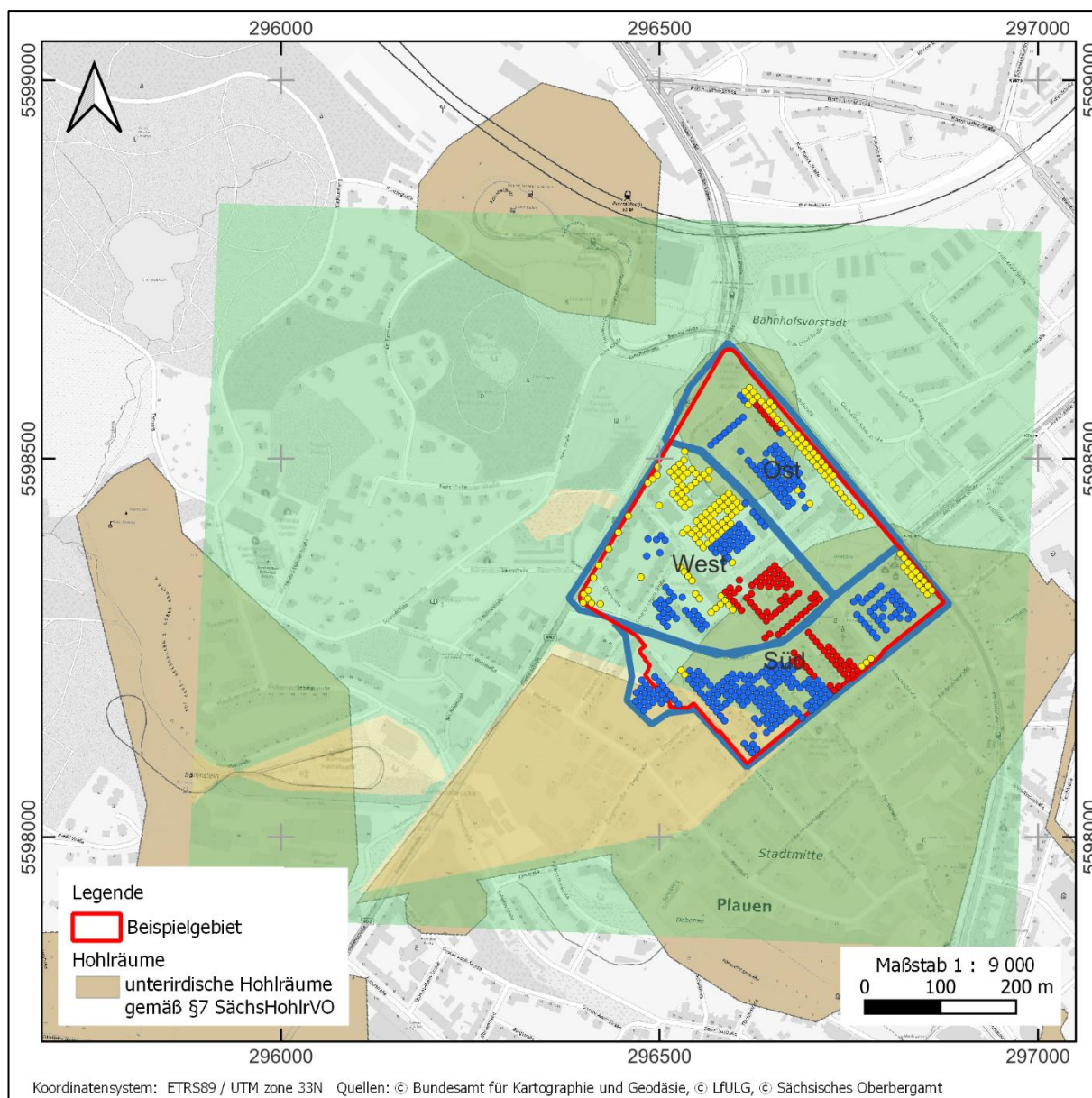


Quelle: BKG, 2023

Abbildung 100: Verteilung der Erdwärmesonden im Beispielgebiet Bahnhofsvorstadt einschließlich ihrer Zuordnung zu den Grundstückseignern

Tabelle 23: Anzahl der geothermischen Bohrungen im Beispielgebiet Bahnhofsvorstadt

Eigentümer	Im gesamten Beispielgebiet	West	Süd	Ost
Stadt Plauen	172	104	21	47
WbG	323	63	198	62
AWG	98	60	32	6
Summe	593	227	251	115



Quellen: BKG, 2023 ; OBA, 2023 ; GeoPLASMA-CE 2019

Abbildung 101: Ausgewiesene Hohlraumgebiete nach dem Oberbergamt (braune Flächen) und nach der Ampelkarte des GeoPLASMA-Projekts (grüne Flächen), einschließlich der EWS nach Grundstückseigentümern

In der weiteren Betrachtung der Sondenpositionierung wurden Flächen mit unterirdischen Hohlräumen in dem Beispielgebiet ausgewiesen. Die Kartenunterlagen und die Angaben des OBA (Abbildung

101) lassen es derzeit nicht zu, die Höhe des Risikos unterirdischer Hohlräume im gesamten Gebiet eindeutig zu bestimmen und die Bedingungen (z.B. maximale Bohrtiefe) zu definieren, die eine Minimierung dieses Risikos ermöglichen. Das Antreffen unterirdischer Hohlräume während des Bohrprozesses kann zu erheblichen technischen Komplikationen führen und eine Verkürzung der Sonden erzwingen. Allerdings sind in diesem Bereich Bohrungen erfasst, welche eine Bohrtiefe von 100 m erreichen. In den Bohrdokumentationen sind keine Hinweise auf das Antreffen unterirdischer Hohlräume verzeichnet. Die Auskünfte zu unterirdischen Hohlräumen des Portals IDA und der Ampelkarte des GeoPLASMA-CE-Projektes weisen zudem deutliche Unterschiede auf.

Die Tabelle 24 fasst den Anteil der Erdwärmesonden zusammen, die innerhalb des Beispielgebietes Bahnhofsvorstadt in und außerhalb von Bereichen mit ausgezeichneten unterirdischen Hohlräumen platziert wurden. Bei Auftreten von unterirdischen Hohlräumen im Projektgebiet ist die Kommunikation mit dem Oberbergamt notwendig, um genaue Informationen zu erhalten und eine zuverlässige Planung durchführen zu können. Eine objektbezogene Anfrage soll bei Umsetzung einer festgelegten Variante und deren Sondenpositionen Aufschluss über die tatsächliche Nutzbarkeit für Erdwärmesonden in diesem Bereich klären. Weiterhin werden für das energetische Konzept alternative Lösungen in Betracht gezogen, wie die Annahme einer Ausfallquote beim Bohrprozess oder die Anwendung eines anderen Systems zur nachhaltigen Energiegewinnung.

Tabelle 24: Anzahl der maximalen Anzahl von EWS, außerhalb Hohlraumgebieten im Beispielgebiet Bahnhofsvorstadt (entsprechend Abbildung 101)

Eigentümer	EWS auf Hohlräumen			
	Gesamt	West	Süd	Ost
Stadt Plauen	124	97	0	27
WbG	88	63	6	19
AWG	14	14	0	0
Summe	226	174	6	46

9.2.3 Potenzialanalyse Luftwärmenutzung

Luft hat keine hohe Wärmekapazität, dennoch kann sie als Wärme- und Kältequelle zu vielen Stunden im Jahr genutzt werden. Ein wesentlicher Vorteil ist im Vergleich zu PV ist, dass ein geringer gerätetechnischer Aufwand zur Gewinnung erforderlich ist und auch nachts das Potenzial zur Verfügung steht.

Zur Kühlung von Industriehallen und Lebensmittelmärkten werden üblicherweise Rückkühler auf den Dächern installiert. Die Leistungsdaten des genutzten Beispielgerätes sind in Tabelle 25 dokumentiert.

Tabelle 25: Leistungskenndaten Rückkühler (Planungsgrundlage)

KenngroÙe	Wert
Leistung	370,9 kW
Wärmeträger	Ethylenglykol, 25 %
Eintrittstemperatur (Luft)	20,0 °C
Austrittstemperatur (Luft)	10,6 °C
Eintrittstemperatur (Wärmeträger)	5,0 °C
Austrittstemperatur (Wärmeträger)	10,0 °C
Schalldruckpegel in 10 m Abstand	35 dB(A)

Der berechnete Schalldruckpegel des Beispielgerätes in 10 m Entfernung in Höhe von 35 dB(A) hält die Vorgaben gemäß TA Lärm für "reine Wohngebiete" und Krankenhäuser zum Zeitpunkt Nacht ein. Bei einer Gebäudebreite von ca. 12 m bleibt ein Abstand zur Gebäudekante von 5 m. Unter Berücksichtigung einer Attika und Schallverwirbelung durch Wind, wird abgeschätzt, dass der Luftschall zum nächsten Fenster keine erhebliche Belastung für die Bewohner darstellt. Eine genaue Berechnung ist unter Prüfung der örtlichen Gegebenheiten durch ein Schallschutzgutachten vorzunehmen.

Unter Berücksichtigung von Mindestabständen zwischen den Geräten für Installation und Wartung werden die Flächen ermittelt, auf denen Geräte montiert werden können. Eine Prüfung der Gebäudestatik wird zunächst nicht vorgenommen. Im Rahmen einer genaueren Projektierung wäre diese zu absolvieren. Es wird davon ausgegangen, dass die Rückkühler auf einer schallentkoppelten Stahlkonstruktion zur Lastverteilung montiert werden müssen.

In der Abbildung 102 sind farbige potenzielle Aufstellflächen zur Positionierung von Rückkühlern dargestellt. Es werden Potenzialflächen für 56 Geräte ermittelt. Unter den genannten Annahmen steht ein Gesamtpotenzial von ca. 20 MW Leistung dem Quartier durch Rückkühler zur Verfügung. Unter Annahme von jährlich 2000 Vollbenutzungsstunden berechnet sich ein potenzieller Wärmeertrag von 40 GWh/a.

9.2.4 Potenzialanalyse PV-Stromerzeugung

Alternativ zur Verwendung der Dachflächen zur Luftwärmegewinnung bietet die PV-Stromerzeugung ein großes Potenzial zur Energiegewinnung. Zur Abschätzung der Dachflächen zur potenziellen PV-Nutzung wurden die Flachdächer im Quartier untersucht. Unter Abzug von Montageabständen zur Dachkante von 2 m und unter Berücksichtigung eines Belegungsanteils des Daches durch Bestandsinstallation (Dachfenster, Rohrleitungen, etc.) von 50 % wurde die nutzbare Aufstellfläche ermittelt. Nach Prüfung der örtlichen Gegebenheiten wurden die Aufstellflächen in reine Süd- sowie Ost-West-Ausrichtung aufgeteilt. Erfahrungswerte aus Referenzprojekten dienten dazu, die potenziellen PV-Modul-Flächen entsprechend der geografischen Ausrichtung zu ermitteln. Infolgedessen berechnet sich eine potenzielle Modul-Fläche von ca. 1.990 m² zur photovoltaischen Nutzung. Diese Fläche bietet Potenzial zur

Montage von ca. 1.000 Modulen. Unter Verwendung dieser Module wird eine Gesamtleistung von ca. 440 kWp berechnet. Unter Annahme eines photovoltaischen Ertrages von 1000 kWh/(a·kWp) kann ein Jahresertrag von 440 MWh abgeschätzt werden.

9.3 Erstellung einer HeatMap

Ziel dieses Kapitels ist es, in einer übersichtlichen kartographischen Darstellung sowohl Wärmebedarfe (siehe Kapitel 9.1.1) und Wärmepotenziale (siehe Kapitel 9.2) abzubilden, um im Folgenden Wärmeerzeugungs- und Verteilungsstrategien erstellen zu können (Kapitel 9.4). Die Darstellung soll als „Heat-Map“ bezeichnet werden. Die freie Geoinformationssystemsoftware „QGIS“ dient als Grundlage zum Erstellen.

9.3.1 Bedarfs- und Potenzialstruktur

In der Abbildung 102 wurden die objektbezogenen Wärmebedarfswerte im QGIS-Projekt erfasst und verortet. Dazu wurde jedem Gebäude eine ID zugewiesen, welche die Verknüpfung des QGIS-Projekts mit der Bedarfswerte-Tabelle der Gebäude herstellt. Für die Erstellung der HeatMap wurden dem Layer definierte Regeln beigefügt, damit bei der Verknüpfung der Dateien sowohl der spezifische Wärmebedarf als auch der absolute Wärmebedarf entsprechend der Legende in der Abbildung dargestellt werden. Der spezifische Wärmebedarf wird farblich (gelb, orange und rot) und der absolute Wärmebedarf in Form des Durchmessers abgestuft dargestellt.

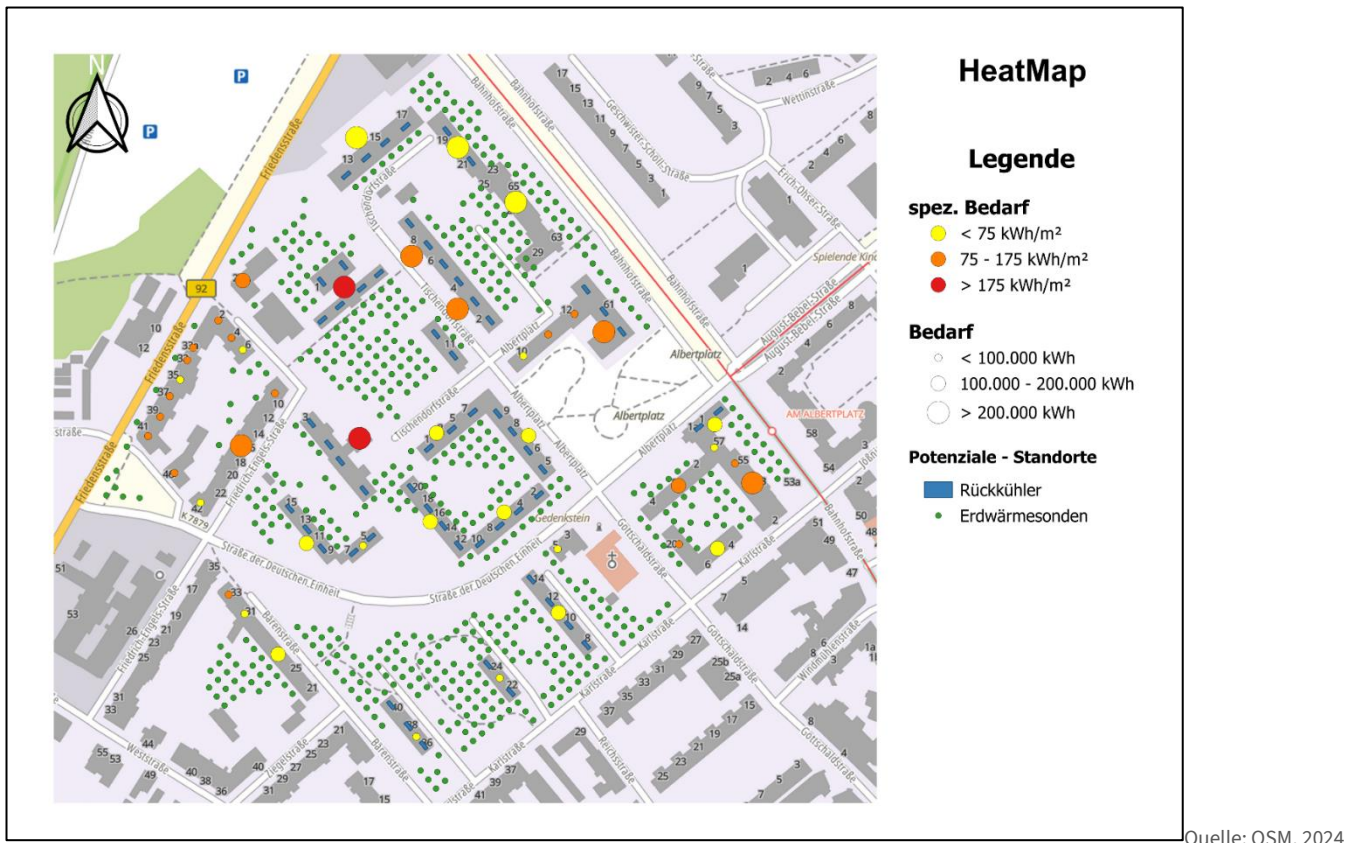


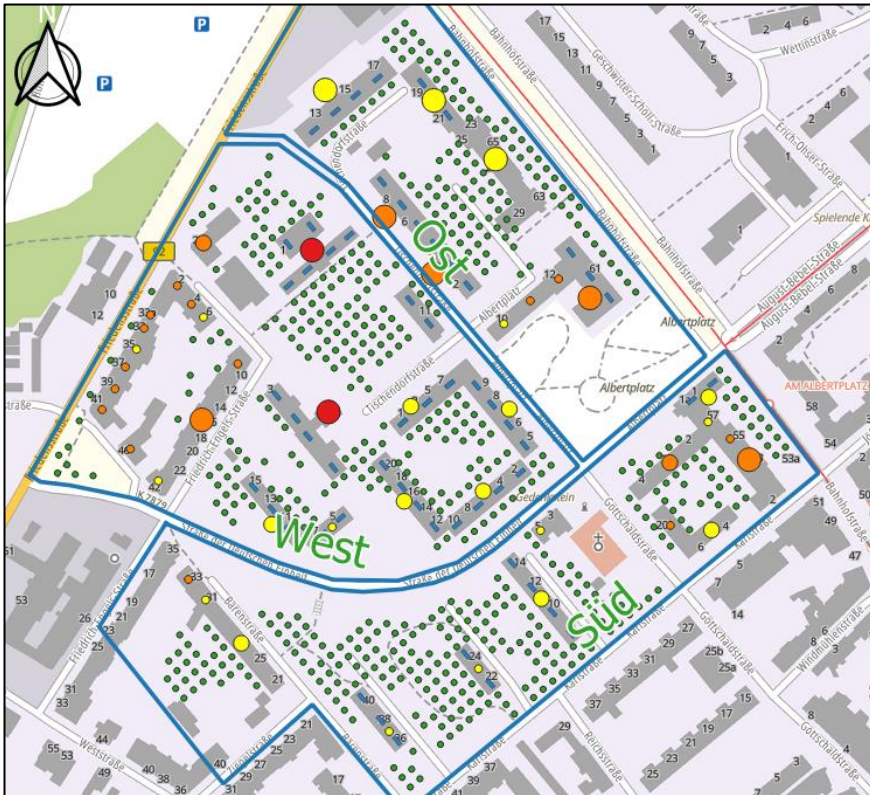
Abbildung 102: „HeatMap“ - Wärmebedarfe und- potenziale in der Bahnhofsvorstadt

9.3.2 Gebiets-Clustering

Ausgehend von der HeatMap wurde im Anschluss eine Gebiets-Clustering vorgenommen. Hintergrund ist die anstehende Prüfung, ob für das gesamte Quartier oder Teile des Quartiers das Erstellen von Wärmenetzen sinnvoll sein kann. Die Unterteilung der Gebiete wurde nicht zu kleinteilig vorgenommen, damit in der nachfolgenden gebietsweisen, geothermischen Simulation der Effekt der thermischen Wechselwirkung zwischen den Sonden berücksichtigt bleibt.

Es wird in die Gebiete Ost und West entlang der Tischendorfer Straße unterteilt, sowie in den Teil Süd, südlich der Straße der deutschen Einheit (Abbildung 103). In der weiteren Bearbeitung kann dann die Summe der Wärmebedarfe und Wärmepotenziale gebietsweise ausgewertet werden (Kapitel 9.4).

Die qualitative Auswertung der HeatMap zeigt bereits, dass eine hohe Bedarfsdichte im nördlichen Teil des Quartiers liegt und eine hohe Potenzialdichte im südlichen Teil. Des Weiteren liegen die Gebäude mit hohem spezifischem Heizwärmebedarf im Teilgebiet West. Es zeichnet sich ab, dass ein Teilgebiet übergreifendes Wärmenetz zur Deckung des Wärmebedarfes mit hohem erneuerbaren Anteil förderlich ist.



Quelle: OSM, 2024

Abbildung 103: Gebiets-Clustering der Bahnhofsvorstadt

9.4 Quartiersanalyse

9.4.1 Datenermittlung

Bedarfsauswertung

In der Tabelle 26 ist der Heizwärmebedarf des Quartiers, unterteilt nach Lage und Nutzungstypisierung dargestellt.

Tabelle 26: Heizwärmebedarf Bahnhofsvorstadt (IST-Zustand). Unterteilung nach Lage und Nutzungstypisierung

IST- Heizwärmebedarf [MWh/a]*	Wohnen (W)	Gewerbe (G)	Öffentliche (Ö)
Ost	1.950	320	0
West	1.576	101	1.126
Süd	1.170	296	0

*exkl. Wärme zur Warmwasserbereitung

In der Abbildung 104, Abbildung 105 und Abbildung 106 wird der Heizwärmebedarf (Ist-Zustand) je Gebiet und Nutzung dargestellt. Farblich ist die Klassifizierung in Gebäudetyp 1/2 und Gebäudetyp 3 hervorgehoben. In allen drei Gebieten ist der Wärmebedarf zum Heizen von Wohnräumen am höchsten. Wohngebäude werden im Quartier überwiegend der Niedertemperaturtauglichkeitsgruppe 1/2 zugeordnet. Mit Ausnahme des Gebietes Ost, da hier überwiegend Gebäude mit Ein-Rohr-Heizungssystemen

bestehen. Öffentliche Gebäude existieren nur im Gebiet West und werden dem Typ 3 zugeordnet. Folglich besteht unter der Maßgabe der getroffenen Annahmen bei diesen Gebäuden ein sehr hoher Sanierungsbedarf. Den überwiegenden Wärmebedarf verzeichnet die Schule mit ca. 650 MWh/a.

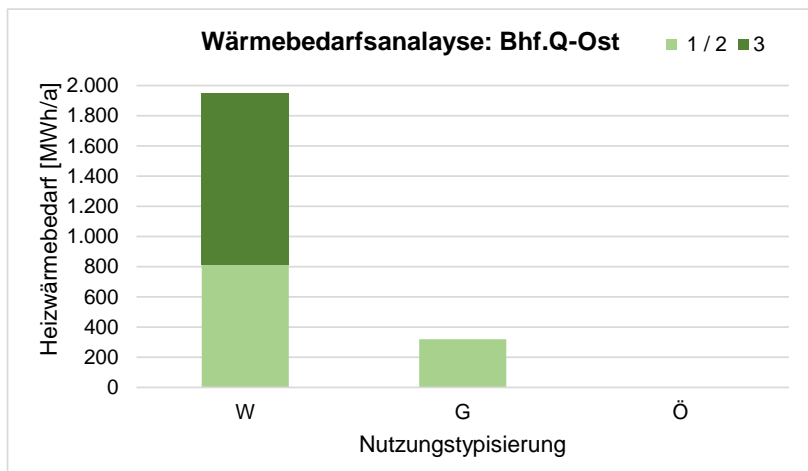


Abbildung 104: IST-Heizwärmebedarf: Bahnhofvorstadt-Ost, je Nutzungstypisierung und NT-Abschätzung

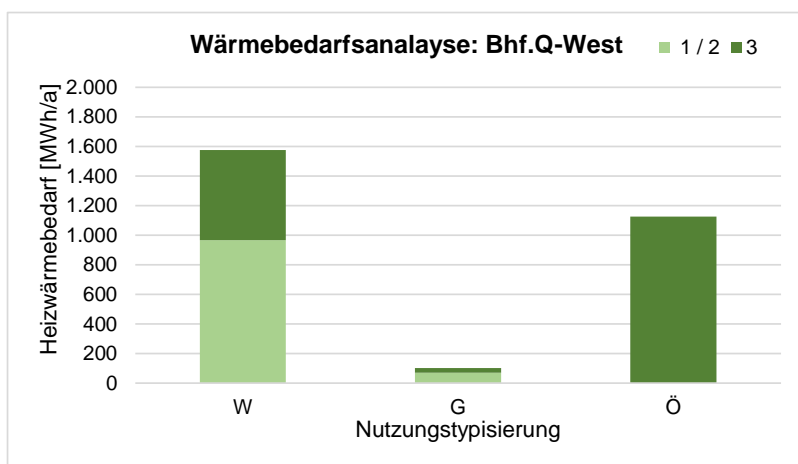


Abbildung 105: IST-Heizwärmebedarf: Bahnhofvorstadt-West, je Nutzungstypisierung und NT-Abschätzung

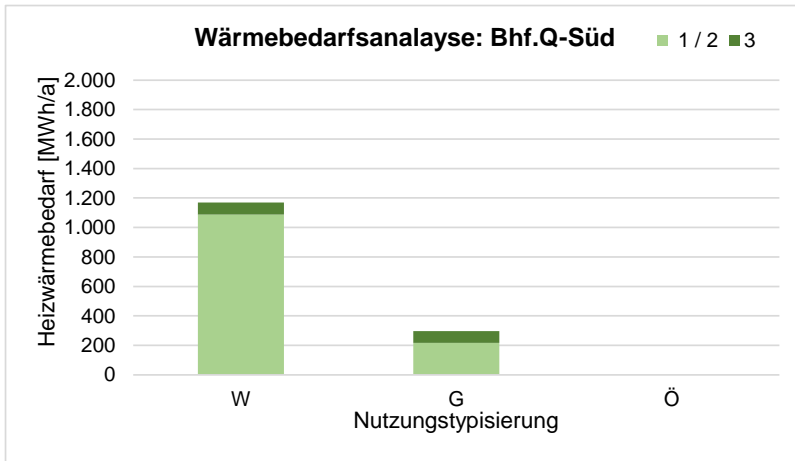


Abbildung 106: IST-Heizwärmebedarf: Bahnhofsvorstadt-Süd, je Nutzungstypisierung und NT-Abschätzung

Die unterschiedlichen Ausprägungen der Gebiete werden deutlich. Für Gebiet Ost sind der sehr hohe Anteil Wohnen und die Elfgeschosser mit Ein-Rohr-Heizung bezeichnend. Das Alleinstellungsmerkmal für Gebiet West ist der hohe Anteil öffentlicher Gebäude. Im Gebiet Süd wird der höchste Anteil von Gebäuden des Typs 1/2 verzeichnet.

Art der Wärmeversorgung (Bestand)

In Abbildung 107 sind die summierten thermischen Hausanschlussleistungen je Wärmequelle dargestellt. In Summe beträgt die Heizleistung ca. 5 MW (ohne Berücksichtigung von Gleichzeitigkeiten). Das Fernwärmenetz, welches aus einem Primärnetz und einem Sekundärnetz besteht, deckt den überwiegenden Anteil der Heizlast. Ungefähr ein Drittel der Heizlast im Quartier wird nicht durch Fernwärme gedeckt. Die betreffenden Gebäude sind in Abbildung 108 schwarz eingerahmt dargestellt.

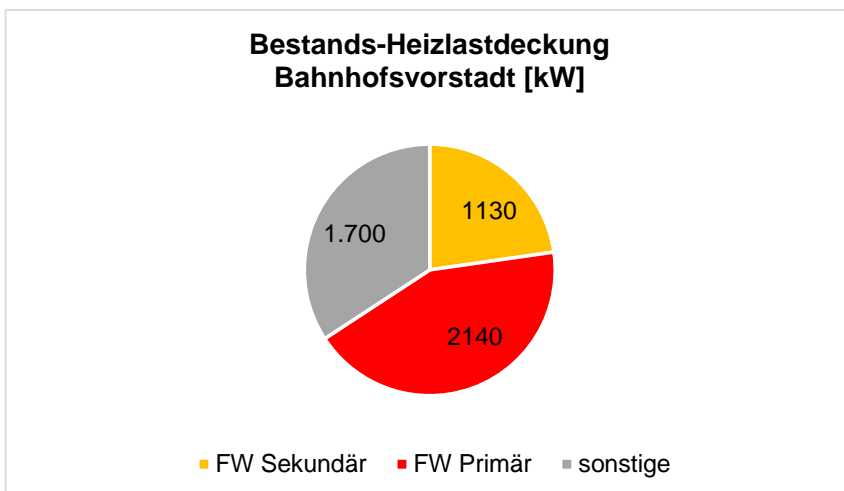
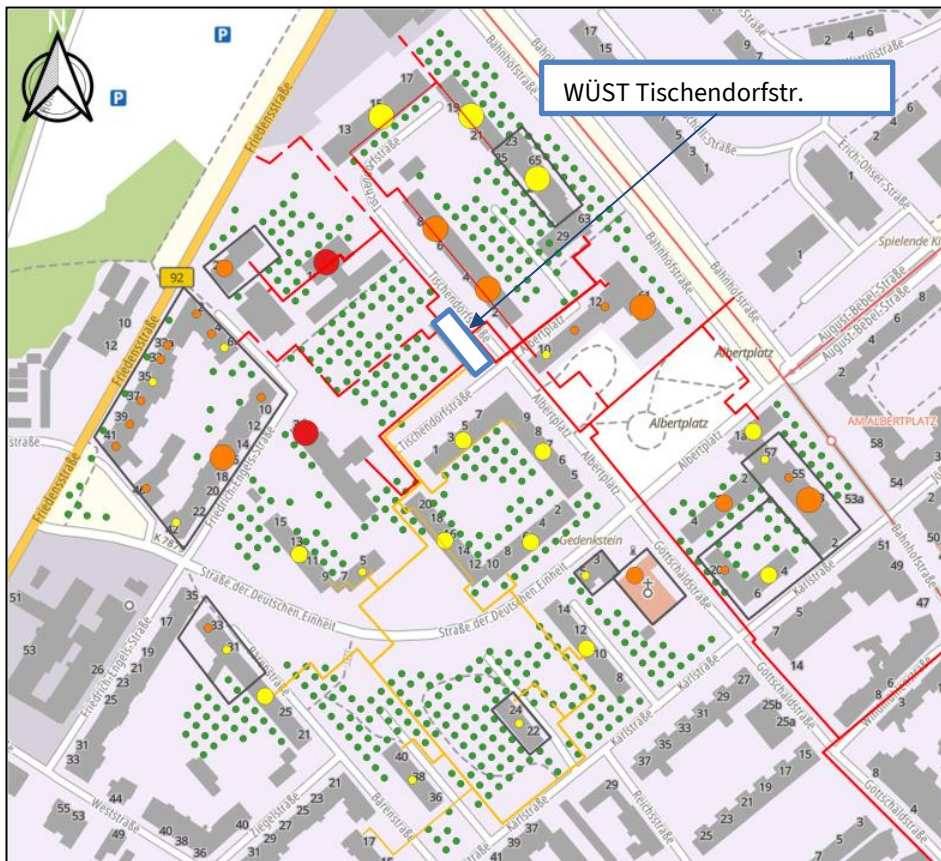


Abbildung 107: Bestands-Wärmeversorgung (Gesamtquartier)



Quelle: OSM, 2024

Abbildung 108: Fernwärme-Netz im Untersuchungsgebiet: Primärnetz (rot), Sekundärnetz (orange) Gebäude mit dezentraler Wärmeversorgung (schwarz eingerahmt)

Bestands-Netz-Analyse

Das Fernwärmenetz wurde überwiegend in den 1970er Jahren gebaut und besteht aus einem Primärnetz (rot) und einem Sekundärnetz (orange), siehe Abbildung 108.

Das Fernwärmenetz wird aktuell aus drei Wärmeerzeugern gespeist. Aus Richtung Südosten (Windmühlenstraße) erfolgt der Wärmetransport in die Wärmeübertragerstation (WÜST) Tischendorfstraße. In der WÜST wird Wärme aus dem Primärnetz mittels Wärmeübertrager an das Sekundärnetz übergeben. Beide Netze sind durch die Wärmeübertrager voneinander hydraulisch getrennt. Von der WÜST breitet sich das Primärnetz und das Sekundärnetz strahlenförmig zu den Verbrauchern aus. Das Sekundärnetz bildet zudem eine Masche von der Tischendorfstraße 20, über die Karlstraße, zur Straße der deutschen Einheit 5 und zurück zur Tischendorfstraße. Einzelne Gebäude sind an die Versorgungsleitung aus Richtung Windmühlenstraße kommend direkt angeschlossen (u.a. Karlstraße 4, Gottschaldstraße 20).

Die gestrichelten Linien in Abbildung 108 charakterisieren Fernwärme-Leitungen, die aktuell nicht in Betrieb sind. Es wird ersichtlich, dass auch die meisten Gebäude, die aktuell nicht mit Fernwärme ver-

sorgt werden, keine große Entfernung zu einer Fernwärmeleitung trennt. Hintergrund ist, dass ursprünglich das Untersuchungsgebiet nahezu vollständig mit Fernwärme versorgt wurde. In der Tabelle 27 sind die Informationen im Formular der Vorunteruntersuchung des Bestands-Fernwärmenetzes dokumentiert. Ungewissheit besteht über den baulichen Zustand der Rohrleitungen. Nach derzeitigem Stand ist ein weiterer Betrieb des Netzes für ca. 20 Jahre nicht sicher möglich. Klar ist, dass die Baukörper (Haubenkanäle etc.) in sanierungsbedürftigem Zustand sind. Des Weiteren verursacht die Wärmedämmung gegenüber einem heutigen Neubau-Standard voraussichtlich ca. 50 - 100 % mehr Wärmeverluste.

Die Auslastung des Fernwärmenetzes bei aktueller Betriebsweise wird als gering eingeschätzt, da die Gebäude gedämmt wurden und einige Verbraucher vom Netz genommen wurden.

Eine detaillierte Bestandsprüfung des Fernwärmenetzes wurde noch nicht vorgenommen, ist jedoch stark zu empfehlen. Beispielsweise kann eine Messung der vorliegenden Rohrwandstärke mittels Ultraschall wichtige Erkenntnisse zur Abschätzung des Sanierungsbedarfes generieren.

Tabelle 27: Formular: Voruntersuchung des Bestands-Fernwärmenetzes

Nr.	Voruntersuchung		Zustand
1.1	Rohrart	Stahlrohr	
1.2	Netztyp: [Zweileiter/ Dreileiter/ Vierleiter]	Zweileiter	
1.3	Temperaturfahrkurve	Primär: 80-112°C/60-55°C, Sekundär: 50-85°C	
1.4	Transmissionswärmeverluste [W/(m·K)]	0,25-0,55	schlecht
1.5	Art der Dämmung	Mineralwolle/Glaswolle	
1.6	Rohrquerschnitte	DN 65-200	
1.7	Bauwerke/Baukörper	Haubenkanal	schlecht
1.8	Betriebsdruck/Auslegungsdruck		
1.9	Pumpen-Verortung	Primär: Sekundär: U Tischendorfstr.	
1.10	Art Leckagesystem	Primär: n.v. Sekundär: n.V.	
1.11	Vorhandensein Streckenarmaturen		

9.4.2 Ermittlung des perspektivischen Bedarfes

In den vorherigen Kapiteln wurde die Bedarfssituation des IST-Standes beschrieben.

Unter der Maßgabe zur Erreichung der Niedertemperaturtauglichkeit Typ 1 bzw. 2 sind Sanierungsmaßnahmen für Gebäude der Tauglichkeitsklasse 3 erforderlich (siehe Kapitel 9.1.3), die zur Nutzung von Geothermie vorausgesetzt werden.

Maßnahmen zur Herstellung der Niedertemperaturtauglichkeit 1/2 können unterteilt werden in Maßnahmen zur Ertüchtigung der thermischen Hülle, sowie in Maßnahmen der Heizungstechnik und Lüftungstechnik. Insbesondere die Maßnahmen der Ertüchtigung der thermischen Hülle zielen darauf ab, den Wärmebedarf eines Gebäudes zu reduzieren. Für die Bahnhofsvorstadt besteht noch keine Planung zu projektspezifischen Sanierungsmaßnahmen. Um einen zu erwartenden Rückgang des perspektivischen Heizwärmebedarfes zu berücksichtigen, wurde zunächst der IST-Heizwärmebedarf der Gebäude des Typs 3 um 15 % reduziert und auf diese Weise der perspektivische Heizwärmebedarf berechnet. Die gleiche Vorgehensweise wurde zur Berechnung der perspektivischen Heizlast angewendet.

Der Wärmebedarf für Warmwasser wurde für Wohngebäude auf 20 kWh/(m²a) abgeschätzt. Darin enthalten sind der Nutzwärmebedarf von 12 kWh/(m²a) (in Anlehnung an GEG 2024) und Wärmeverluste der Warmwasserverteilung im Gebäude von 40 %. Ein Warmwasserbedarf für öffentliche Gebäude und Gewerbe wurde nicht berechnet. Es wird davon ausgegangen, dass in Nichtwohngebäuden eine dezentrale, elektrische Warmwasserbereitung die effizientere und wirtschaftlichere Lösung gegenüber einer zentralen Warmwasserbereitung ist.

In der Tabelle 28 sind die Ergebnisse der Berechnung dokumentiert. Der Gesamtwärmebedarf ist dabei die Summe aus Heizwärmebedarf und Warmwasserbedarf gebäudeseitig und beinhaltet keine Wärmeverluste von der Quartierswärmeerzeugung bis zum Gebäudeeintritt.

Tabelle 28: Perspektivischer Wärmebedarf Bahnhofsvorstadt

Wärmebedarf [MWh/a]	OST	WEST	SÜD	Gesamt
IST-Heizwärmebedarf	2.300	2.800	1.500	6.600
perspektivischer Heizwärmebedarf	2.100	2.500	1.400	6.000
perspektivischer Warmwasserbedarf	700	500	400	1.600
perspektivischer Gesamtwärmebedarf	2.800	3.000	1.800	7.600

9.4.3 Vorauswahl der Versorgungsstruktur

Grundlegend für die Wahl der Versorgungsstruktur ist die Verteilung von Wärmebedarfen und Wärmepotenzialen im Quartier.

In der Tabelle 29 ist der perspektivische Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser einer ersten Abschätzung des geothermischen Potenzials für Bohrungen mit 200 m und 300 m Tiefe gegenübergestellt. Nicht enthalten im Wärmebedarf sind Wärmeverluste eines möglichen Wärmenetzes, da diese erst nach Wahl der Versorgungsstruktur berechnet werden können. Die Abschätzung des geothermischen Potenzials soll eine erste Orientierung zur Bewertung des Verhältnisses aus geothermischen Potenzialen und Wärmebedarf ermöglichen und erhebt keinen Anspruch auf Berücksichtigung diverser geologischer und hydrologischer Themenstellungen wie beispielsweise der Beschaffenheit des Untergrundes oder des Grundwasserstandes (Details, siehe Kapitel 4).

Je Teilquartier wurden anhand der Anzahl potenzieller Bohrungen, gemäß Kapitel 9.2.1, die potenziellen Bohrmeter für die Tiefen 200 m und 300 m berechnet. Aufgrund des hohen Energiebedarfs und der teilweise eingeschränkten Platzverfügbarkeit der Teilquartiere können durch große Bohrtiefen möglichst hohe Abdeckungen eines Heiz- und Kühlbedarfs erreicht werden. Die geologischen Voraussetzungen am Standort Plauen begünstigen diese Bohrtiefen. Unter Annahme einer 50 % Regeneration wurde auf Basis von Erfahrungswerten der geothermische Ertrag auf 50 kWh(m·a) abgeschätzt. Des Weiteren wurde unter Annahme einer JAZ = 4 die Wärme nach Zufuhr elektrischer Energie durch Kompression in der WP berechnet und in Tabelle 29, Spalte 3 und 4 dargestellt. Der Deckungsanteil in Spalte 5 und 6 berechnet sich aus dem Quotienten von Spalte 3 und 2 bzw. Spalte 4 und 2.

Die Gegenüberstellung zeigt folgendes Ergebnis:

- Der Deckungsanteil kann bei nahe 100 % liegen, wenn die Teilgebiete unter den getroffenen Annahmen zusammenhängend betrachtet werden (Deckungsanteil bei 200 m 103 % bzw. bei 300 m 155 %).
- Der Deckungsanteil kann nur 75 % in jedem Teilgebiet separat erreichen, wenn mindestens 300 m Sonden mit 50% Regeneration betrieben werden. In diesem Szenario sind deutliche Überschüsse in den Teilgebieten West und Süd zu verzeichnen.

Tabelle 29: Gebietsweise Gegenüberstellung von Wärmebedarf und geothermischem Potenzial in MWh/a

	Perspektivischer Wärmebedarf HZ-WWB	Potenzial GeoT, WP-Austritt		Deckungsanteil	
		200m/50%	300m%50%	200m/50%	300m%50%
Ost	2.800	1.500	2.300	54%	82%
West	3.000	3.000	4.500	100%	150%
Süd	1.800	3.300	5.000	183%	278%
Gesamt	7.600	7.800	11.800	103%	155%

Zwischenfazit ist, dass eine 100 %-ige geothermische Wärmeversorgung unter der Maßgabe der angenommenen Tiefen und Regenerationsanteile nur bei einem Teilgebiet übergreifenden Wärmeversorgung möglich ist. Das Erreichen einer 75 % Deckung ist voraussichtlich auch in den Teilgebieten separat möglich. Flexiblere Möglichkeiten der Potenzialnutzung und Regeneration bieten sich jedoch Teilgebiet übergreifend an. Eine Wärmenetzlösung ist im konkreten Fall der Bahnhofsvorstadt besonders aufgrund der Gefahr auf Hohlräume zu empfehlen (siehe Kapitel 10.2.2), da vielfältige Möglichkeiten des Wärmemanagements entstehen.

9.4.4 Quartierssteckbrief

Der Quartierssteckbrief (siehe Anhang A 3.1) bildet die Zusammenfassung der wesentlichen Quartiers-Daten in kompakter Form und den Abschluss der Quartiersanalyse.

Ausgewiesen sind Kenndaten in folgender Untergliederung: Wärmeerzeugung und Heizungstechnik, Heizwärmebedarf, Warmwasserbereitung (WWB), Gesamtwärmebedarf Gebäude, Gebäudeclusterung, sowie Wärmepotenziale aus Umwelt und Abwärme.

Die Wärmebedarfsanalyse ist unterteilt in IST-Werte (z.T. aus Verbrauchsmessungen) und perspektivischen Werten. Ohne zusätzliche Kennzeichnung sind dies IST-Werte. Die perspektivischen Werte hingegen sind in grüner Schrift gekennzeichnet und mit dem Präfix "p." versehen.

9.5 Variantenerstellung

9.5.1 Variantenüberblick

Nach dem die Quartiersanalyse abgeschlossen ist, folgt die Variantenerstellung im Rahmen der Konzeption. In der Abbildung 109 werden die drei Varianten der Bahnhofsvorstadt dargestellt. Die Varianten unterscheiden sich in der Art der Wärmeverteilung, der WP-Strategie, dem erneuerbaren Deckungsanteil und der Art der Spitzenlastdeckung.

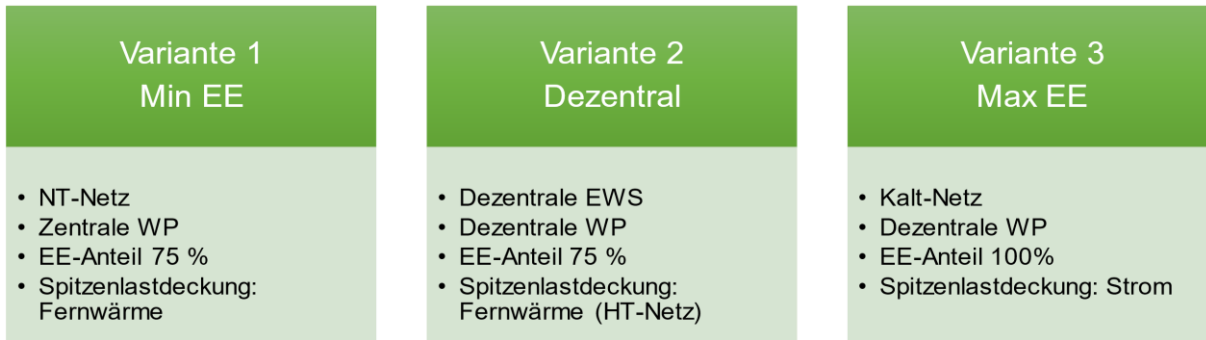


Abbildung 109: Variantenüberblick Bahnhofsvorstadt

9.5.2 Variante 1

Das Funktionsschema der Variante 1 wird in Abbildung 110 dargestellt.

Wärmeerzeugung

Das Wärmekonzept der Variante 1 besteht aus zwei Energiezentralen im Quartier, die aus geothermischer Energie Heizwärme produzieren und in ein Niedertemperaturnetz (siehe Kapitel 5) einspeisen. Eine der Energiezentralen ist in der bisherigen WÜST Tischendorfstraße vorgesehen und wird im Wesentlichen den nördlichen Teil des Quartiers mit Wärme versorgen. Eine zweite Energiezentrale könnte in der Karlstraße eingerichtet werden und das dortige geothermische Potenzial zu Heizwärme aufbereiten. Je Energiezentrale ist ein "Sole-Netz" (grün/hellgrün) erforderlich um die Wärme der Erdwärmesonden zu den WP zu fördern. Zur Erdwärmesondenregeneration werden Rückkühler verwendet, die Wärme aus der Außenluft gewinnen.

Zur Erhöhung der Effizienz wird die Vorlauftemperatur der WP auf 50 °C begrenzt und entsprechend der Außentemperatur eine gleitende Netzvorlauftemperatur eingestellt. Zur Deckung der Spitzenlasten wird zusätzlich Fernwärme aus der WÜST Tischendorfstr. in das Niedertemperaturnetz eingespeist.

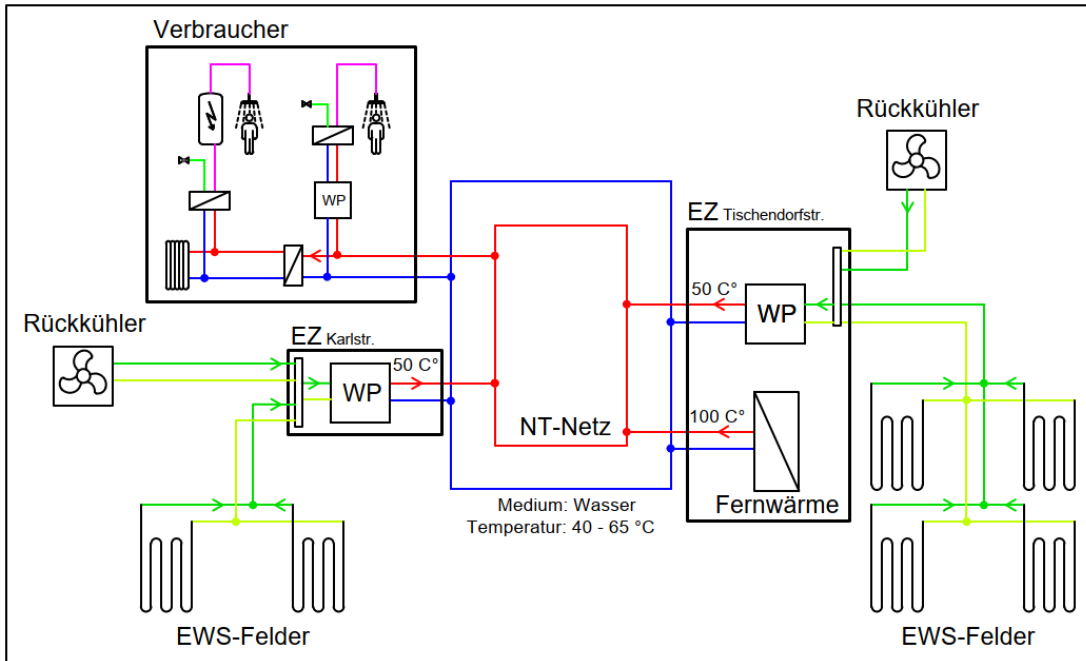


Abbildung 110: Funktionsschema Niedertemperaturnetz mit Energiezentralen und Erdwärmesondenfeldern

Wärmeverteilung

Das Niedertemperaturnetz, bestehend aus Vorlauf (rot) und Rücklauf (blau), wird zur überwiegenden Zeit des Jahres mit maximal 50 °C betrieben. Zu Spitzenlastzeiten kann die Vorlauftemperatur mittels Fernwärme auf maximal 65 °C ansteigen. Es wird ganzjährig eine möglichst geringe Vorlauftemperatur eingestellt, um Wärmeverluste zu verringern und die Effizienz der WP zu maximieren. Die Vorlauftemperatur wird an die Außentemperatur angepasst und zwischen 42 und 65 °C eingestellt (siehe Abbildung 111). Die niedrige Vorlauftemperatur hat zusätzlich den Vorteil, dass flexible Kunststoff-Rohrleitungen genutzt werden können. Je nach Zustand können auch Strecken des Fernwärme-Bestands-Netzes verwendet werden.

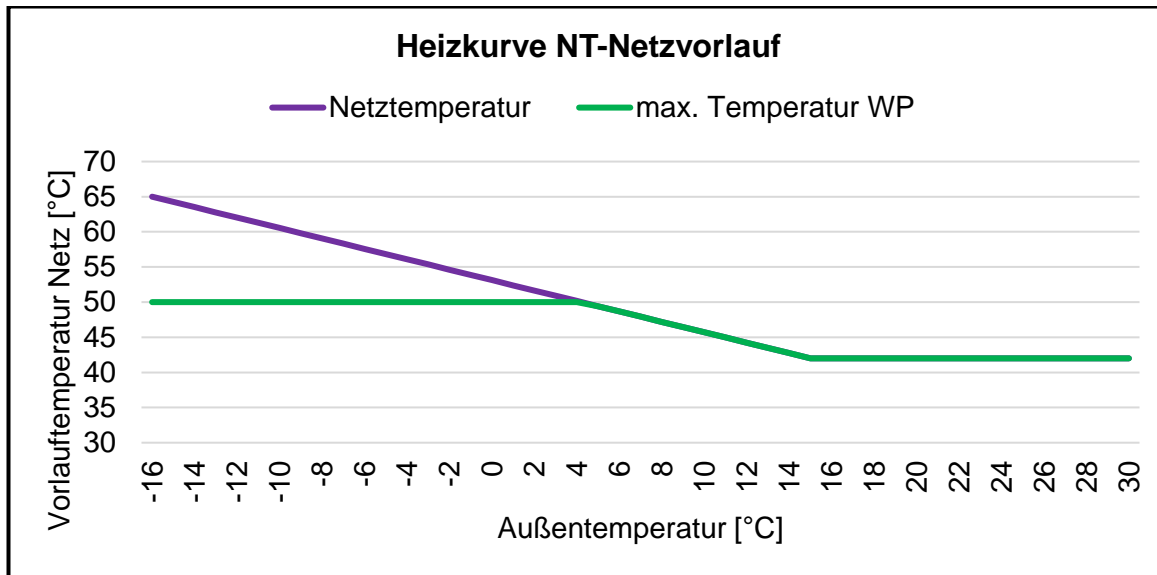


Abbildung 111: Vorlauftemperatur NT-Netz und Begrenzung der WP auf 50°C

Wärmebereitstellung am Verbraucher

Die Hausanschlussstation (HAST) bestehend aus einem Wärmeübertrager und einer Pumpengruppe sowie Mess- und Regelungstechnik wird primärseitig mit Wärme aus dem Niedertemperaturnetz versorgt (Abbildung 110). Zur zentralen Trinkwasserbereitung je Gebäude werden mittels Booster-WP oder elektrischer Nacherhitzung Warmwassertemperaturen von über 60 °C bereitgestellt.

Zusätzlich kann die Fernwärme mittels Temperaturerhöhung Spitzenlasten im Winter decken.

In der Abbildung 112 sind schematisch die Temperaturen dargestellt, die als Annahmen in der Simulation verwendet werden.

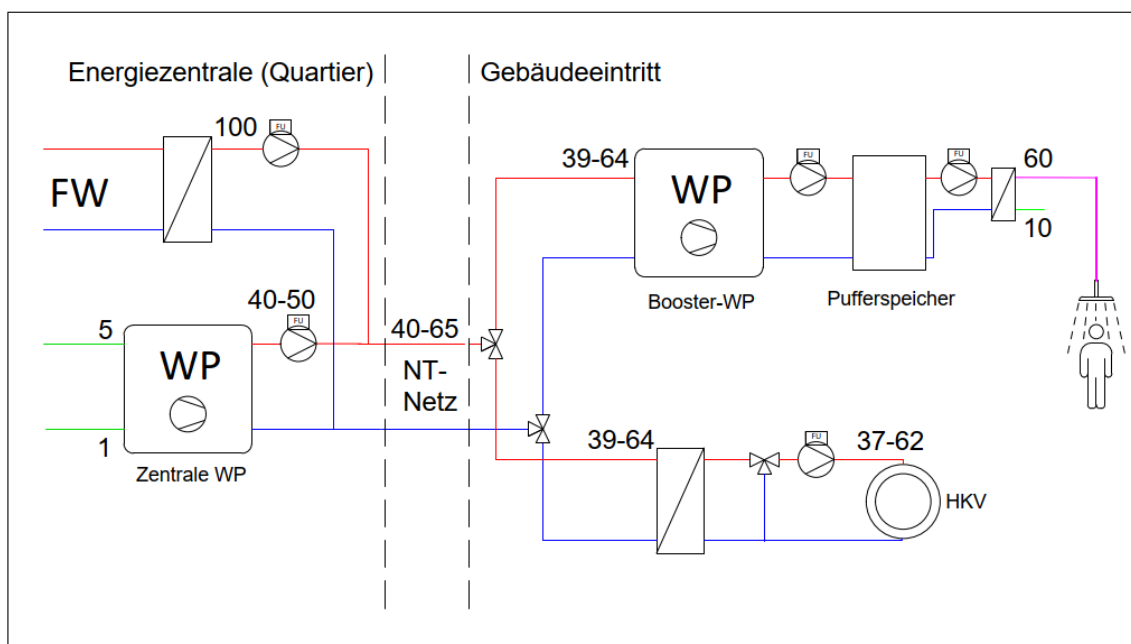


Abbildung 112: Niedertemperaturnetz: Temperaturen am Erzeuger und am Verbraucher

Nutzungsprüfung des Bestands-Fernwärmenetzes

Im Rahmen der Variantenuntersuchung wurde eine Nutzungsprüfung des Bestands-Fernwärmenetzes vorgenommen. Folgende Parameter wurden untersucht: Trassierung und Querschnitte.

Trassierung

In der Abbildung 113 ist die HeatMap des Quartiers mit dem Bestands-Fernwärmenetz abgebildet:

Das Primärnetz (rot) versorgt die WÜST aktuell mit Wärme aus dem Fernwärmenetz. Bei der Realisierung der Variante 1 bliebe die Fernwärmeversorgung auf diesen Weg bestehen. Folgende Maßnahmen wären zur Weiternutzung des Bestandsnetzes und zur flächendeckenden NT-Wärmeversorgung erforderlich.

Tabelle 30: Maßnahmen zur Weiternutzung des Bestandsnetzes

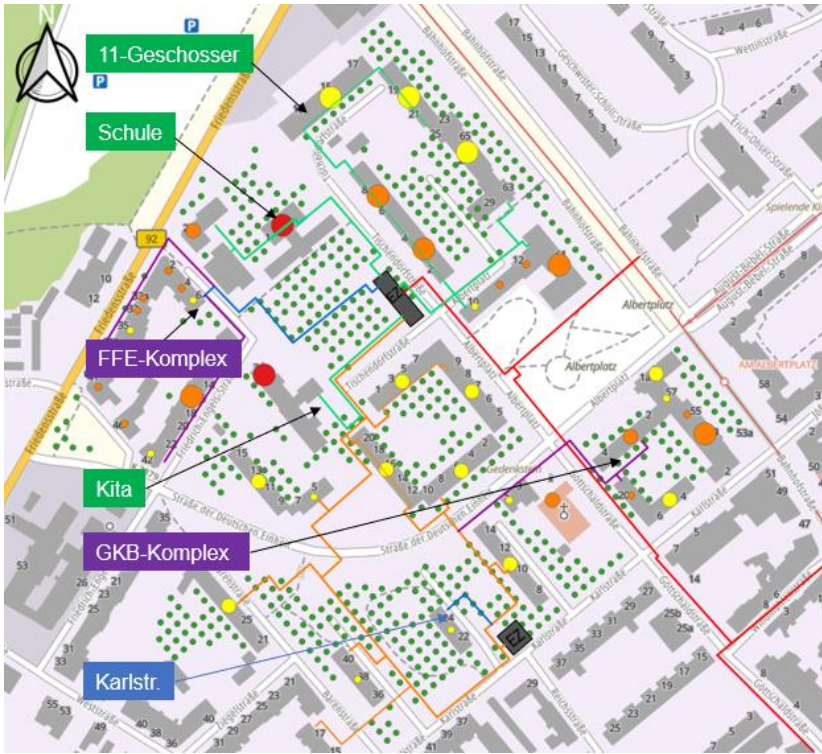
Nr.	Maßnahme	Farbe des Netz-Kapitels
1.	Umbau Sekundärnetz zu neuem NT-Netz	orange
2.	Trennung vom Primärnetz und Verschaltung mit NT-Netz <i>Im Bestand gehen die Leitungen strahlenförmig von der WÜST aus. Diese müssen vom Primärnetz hydraulisch getrennt werden</i>	grün
3.	Wiederinbetriebnahme/ Wiederinstandsetzung	blau
4.	Netzausbau	violett

Überprüfung der Rohrquerschnitte

Die Überprüfung der Bestands-Rohrquerschnitte zur Nutzung als Niedertemperaturnetz wurde auf Basis folgender Annahmen vorgenommen:

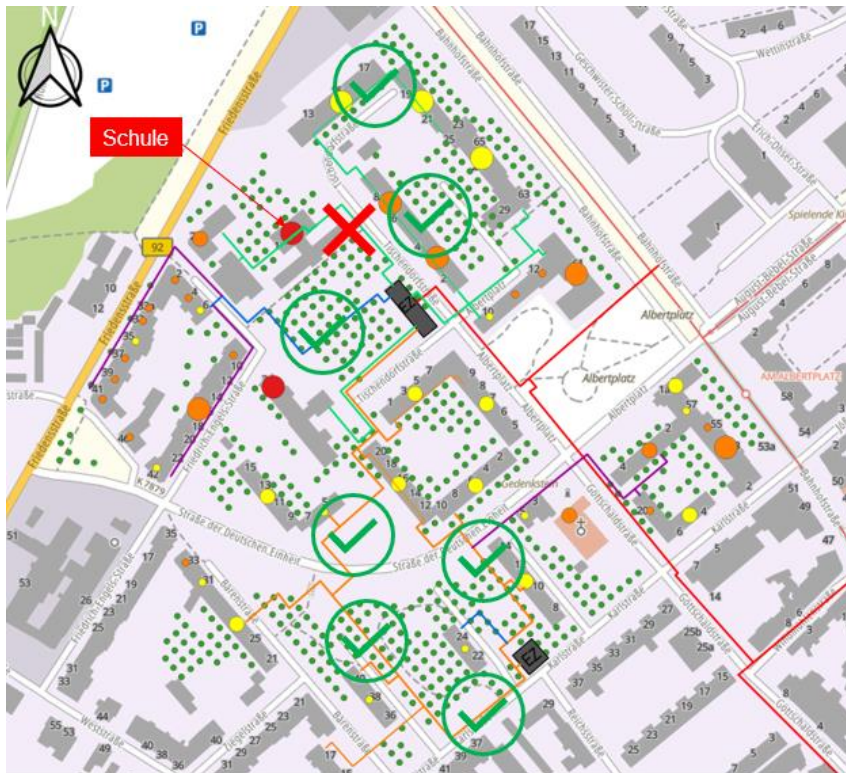
- Differenz zwischen Vor- und Rücklauf (Spreizung): 10 K,
- Anschlussrate: 100%,
- Maximal zulässiger Druckverlust: 200 Pa/m.

Das Ergebnis der Querschnittsüberprüfung ist kartographisch in Abbildung 114 dargestellt. Der Rohrquerschnitt zur Versorgung der Schule ist zu klein. Alle anderen Leitungen weisen die erforderlichen Querschnitte gemäß den getroffenen Annahmen auf. Hervorzuheben ist, dass wie in Kapitel 9.4.1 erläutert, das Bestands-Fernwärmenetz, insbesondere die Stahlbetonelemente, sanierungsbedürftig sind. Weitere Maßnahmen zur Bewertung der Weiternutzbarkeit sind erforderlich.



Quelle: OSM, 2024

Abbildung 113: Nutzungsprüfung Bestands-Fernwärmenetz: Trassierung: (rot) Primärnetz, (orange) Sekundärnetz, (grün) Netzbau, (blau) Netzwiederinbetriebnahme, (violett) Netzausbau



Quelle: OSM, 2024

Abbildung 114: Ergebnis der Querschnittsüberprüfung

9.5.3 Variante 2

Die Funktionsweise der Variante 2 wird in Abbildung 115 dargestellt.

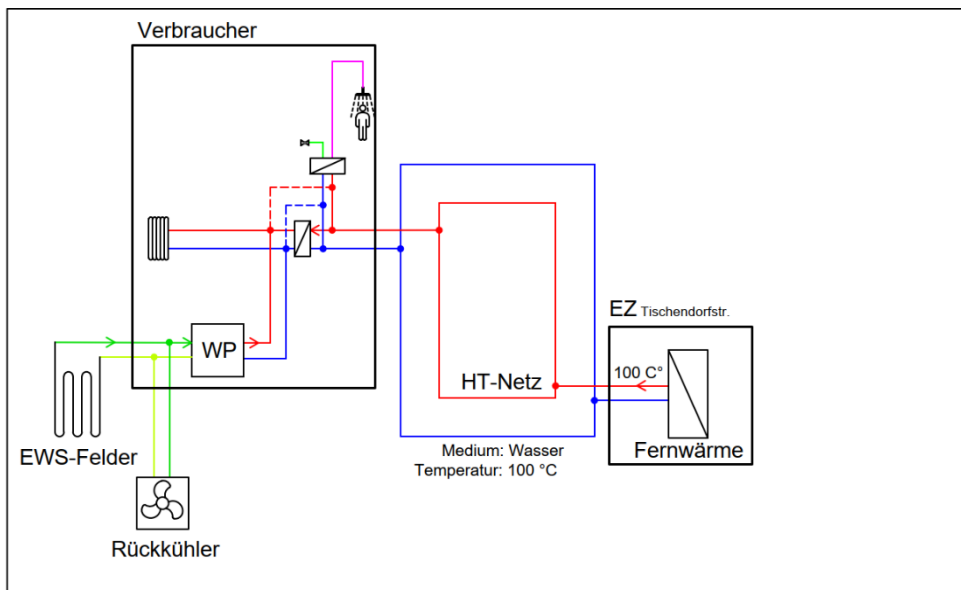


Abbildung 115: Hochtemperaturnetz mit dezentralen WP-Anlagen

Wärmeerzeugung

Das Wärmekonzept der Variante 2 besteht aus dezentralen Wärmepumpenanlagen je Verbraucher, die aus geothermischer Energie Heizungswärme zur Grundlastabdeckung produzieren und dem Gebäude zur Verfügung stellen. Jeder Verbraucher mit WP verfügt über ein separates "Sole-Netz" (grün/hellgrün) um die Wärme der Erdwärmesonden zu den Wärmepumpen zu fördern, bzw. die Regenerationswärme aus den Rückkühlern den Sonden zurückzuführen.

Die bisherige WÜST Tischendorfstraße wird weiter als Energiezentrale fungieren und zur Spitzenlastdeckung Fernwärme in ein Hochtemperatur-FW-Netz speisen.

Wärmeverteilung

Im gesamten Quartier wird ein FW-Netz zur Spitzenlastdeckung betrieben. Das Temperaturniveau liegt bei ca. 100 °C (Hochtemperaturniveau). Je nach Zustand, kann das Bestands-Netz weiter als Fernwärmenetz dienen.

Wärmebereitstellung am Verbraucher

Die Grundlastdeckung von Heizung und Trinkwarmwasser erfolgt durch Wärmepumpen. Die Hausanschlussstation (HAST) bestehend aus einem Wärmeübertrager und einer Pumpengruppe sowie Mess- und Regelungstechnik wird primärseitig mit Wärme aus dem Hochtemperaturnetz versorgt. Zur zentralen Trinkwasserbereitung je Gebäude kann die Fernwärme oder die WP genutzt werden.

9.5.4 Variante 3

Die Funktionsweise der Variante 3 wird in Abbildung 116 dargestellt.

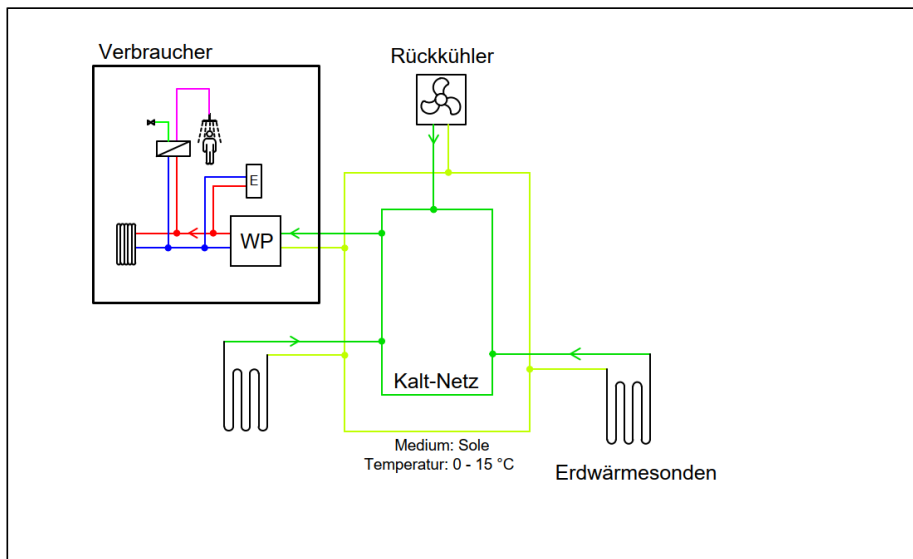


Abbildung 116: Funktionsschema Kalt-Netz mit Verbrauchern und Erdwärmesondenfeldern

Wärmeerzeugung

Zur Umweltwärmegewinnung im Konzept dienen im Wesentlichen Erdwärmesondenfelder (EWS-Felder), die im Quartier verteilt angeordnet sind. Zur Regeneration der EWS wird mittels Rückkühlern aus der Außenluft Wärme gewonnen und den EWS im Sommerhalbjahr zugeführt. Im Quartier werden keine Energiezentralen errichtet und betrieben, die gebäudeübergreifend Heizungswärme bereitstellen. Die Aufbereitung der Umweltwärme zu Heizungs- und Trinkwasserwärme erfolgt in den Gebäuden der Verbraucher mittels Wärmepumpen. Ziel des Konzeptes ist, den Wärmebedarf des Quartiers zu nahezu 100 % aus erneuerbaren Wärmequellen zu decken.

Wärmeverteilung

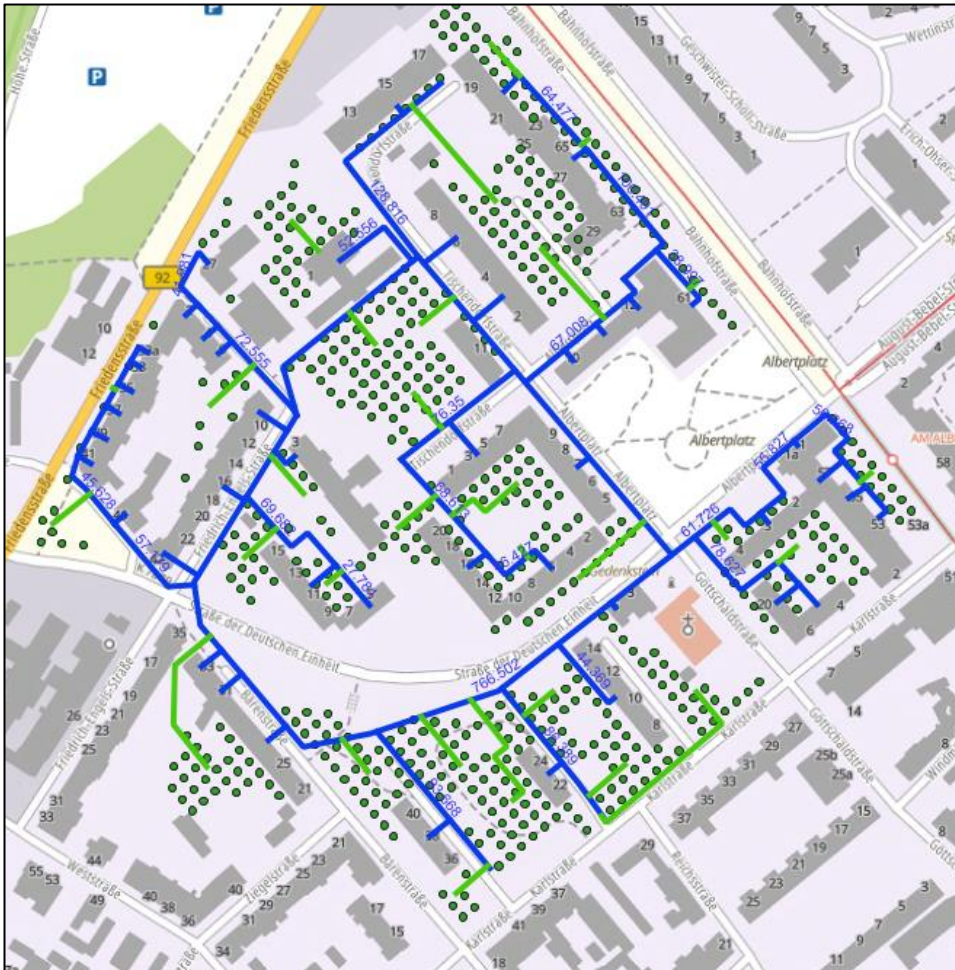
Die Wärmeverteilung im Quartier erfolgt über ein "Kalt-Netz" (siehe Kapitel 5.2), welches mit dem Medium Sole (Wasser-Glykolgemisch als Frostschutzmittel) im Temperaturbereich zwischen 0 bis 15 °C betrieben wird (grün/ hellgrün) (siehe Abbildung 116). Umweltwärme aus EWS-Feldern und Rückkühlern wird in das Kalt-Netz gespeist und im Quartier verteilt. Auf diese Weise wird eine flächendeckende Verteilung der Umweltwärmepotenziale ermöglicht. Die Dysbalance zwischen dem hohen Wärmebedarf in den Teilgebieten Ost und West und dem hohen geothermischen Potenzial im Teilgebiet Süd kann somit ausgeglichen werden. Das Kalt-Netz ist zur bidirektionalen Wärmeversorgung als Ringnetz angelegt (Quelle: OSM 2024, Abbildung 117). Eine übergeordnete Regelung misst Temperaturen an den Umweltwärmequellen und schaltet Pumpen zum Wärmeeintrag in das Kalt-Netz bzw. zum Wärmeentzug (Sonden-Regeneration). Je nach Wärmebedarf an den Verbrauchern werden Ventile zur Bereitstellung des Sollvolumenstromes geöffnet.

Die Rohrleitungen des Kalt-Netzes bestehen aus unisoliertem PE-Rohr. Da die Mediumstemperatur der Sole nahe bzw. meist unterhalb der Erdreichtemperatur liegt, werden in der Jahressumme keine Wärmeverluste, sondern Wärmegewinne verzeichnet. Umso größer das Kalt-Netz ist, desto mehr Wärme kann vom Erdreich aufgenommen werden und andere Umweltwärmequellen können verringert genutzt werden, ohne die Anforderung des Mindest-EE-Anteils zu berechnen. Die Rohrquerschnitte des Kalt-Netzes erfordern große Dimensionen, da erstens der Betrieb mit einer geringen Temperaturspreizung von 4 K erfolgt und demnach die nötigen Volumenströme hoch sind. Zweitens, werden geringe Druckverluste zur Minimierung von Pumpenenergie und zur Ermöglichung einer vereinfachten Regelung angestrebt.

Wärmebereitstellung am Verbraucher

Am Verbraucher treten Vorlauf- und Rücklaufleitung des Kalt-Netzes in das Gebäude ein (Abbildung 116 / Abbildung 118). Je Gebäude/ Gebäudekomplex ist eine Energiezentrale erforderlich, in der eine Wärmepumpenanlage aus der Umweltwärme des Kalt-Netzes Wärme für Heizung und Trinkwasser bereitet. Eine zusätzliche Pufferspeicheranlage zur Verringerung der Taktung der Wärmepumpen sind je Energiezentrale erforderlich. Je nach Art der Trinkwasserbereitungsanlage wird ein separater Trinkwasserspeicher/ Hochtemperaturspeicher erforderlich.

Zur Spitzenlastdeckung wird ein elektrischer Heizkessel (E-Kessel) eingesetzt. Zur Effizienzsteigerung der Wärmepumpe wird die erzeugte Vorlauftemperatur je nach Außentemperatur und Heizkurve gleitend eingestellt. Die Trinkwarmwasserbereitung erfolgt auf mindestens 60 °C. In der Abbildung 118 sind die Temperaturannahmen abgebildet, die in der Jahressimulation zu Grunde gelegt sind.



Quelle: OSM, 2024

Abbildung 117: Entwurf Kalt-Netz (blau) mit Anbindeleitungen an EWS-Schächte (grün)

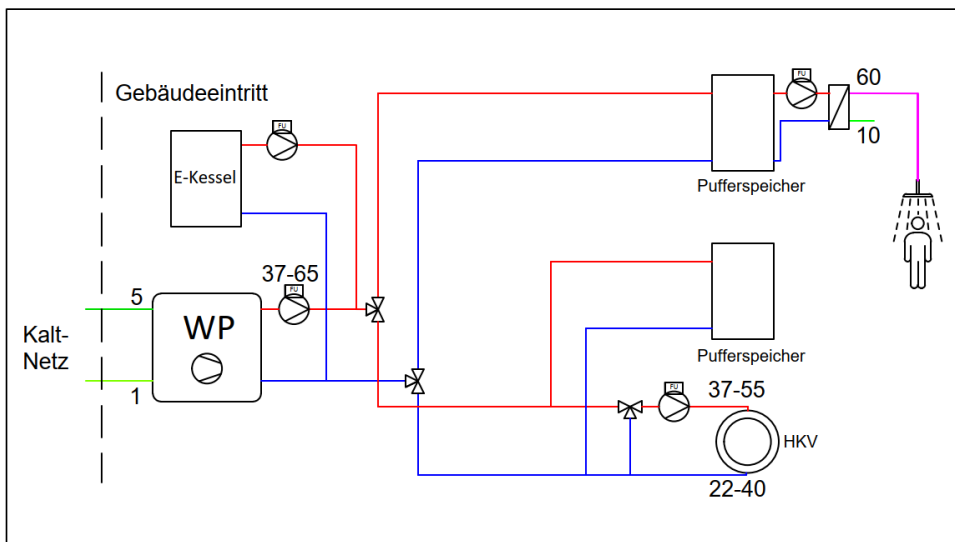


Abbildung 118: Bahnhofsvorstadt, Variante 3: dezentrale Wärmeerzeuger und Temperaturen in °C

9.5.5 Festlegung einer Vorzugsvariante

Zur Ermittlung einer Vorzugsvariante, die im Anschluss näher untersucht werden soll, sind in der Tabelle 31 die beschriebenen Varianten anhand verschiedener Kriterien einander gegenübergestellt. Die

Tabelle zeigt, dass die Nutzbarkeit des geothermischen Potenzials in der Variante 3 am besten ist. Ursache dafür ist, die Vernetzung von Verbrauchern, EWS und Rückkühler mittels Kalt-Netz. Wärme und Kälte kann ganzjährig flächig im gesamten Quartier entnommen und entsprechend des Bedarfes verteilt werden. Die flächige Geothermienutzung ist in der Variante 1 auch möglich, da die aufbereitete Wärme der zentralen Wärmepumpen im gesamten Quartier verteilt wird. Die zwei Energiezentralen werden jedoch von zwei separaten EWS-Feldern versorgt, die nicht miteinander verbunden sind. In der Variante 3 ist die Nutzbarkeit der Geothermie nicht ausgeglichen möglich, da die EWS-Felder nur einzelne Verbraucher mit geothermischer Wärme versorgen und nicht miteinander verbunden sind. Folglich kann jedes Gebäude nur die Bohrpunkte zur geothermischen Wärmegewinnung nutzen, die in unmittelbarem Umkreis des Gebäudes liegen. Gebäude mit hohem Wärmebedarf und geringer Zahl möglicher Bohrpunkte können folglich keinen hohen geothermischen Deckungsanteil erreichen und es ist unbekannt, ob die gesetzlichen Mindestanforderungen des EE-Anteils für jedes Gebäude mittels Geothermie eingehalten werden können.

Tabelle 31: Variantenvergleich Bahnhofsvorstadt

	Variante 1 NT-Netz + Fernwärme	Variante 2 Dez. WP + Fernwärme	Variante 3 Dez. WP + Kalt-Netz
Nachhaltigkeit:			
Nutzbarkeit geotherm. Potenzial	gut	nicht ausgeglichen möglich	sehr gut
potenzieller EE-Anteil d. Wärmebereitstellung	sehr gut	gut	sehr gut
Einhaltung Min EE-Anteil	ja	unbekannt	ja
System-Effizienz:			
Wärmeverluste Verteilnetz	niedrige Verluste	hohe Verluste	Wärmegewinne!
Effizienz WP-Anlagen	mittel	mittel	hoch
Komplexität:			
erf. Aufwand Regelung und Steuerung	hoch	sehr hoch	sehr hoch
Betrieb:			
Wartungsaufwand	gering. Nur 2 WP-Anlagen	hoch. Viele WP-Anlagen	hoch. Viele WP-Anlagen
Ausfallsicherheit Umweltwärmequellen	hoch. aufgrund Netz	gering	Hoch. aufgrund Netz
Kosten:			
Investition	vergleichsweise Gering: 2 WP-Anlagen, Nutzung Fernwärme	mittel. Vielzahl kleiner WP-Anlagen	hoch. Vielzahl kleiner WP-Anlagen und Verzicht Fernwärme. Folglich entsprechend mehr erf. EWS.

Die Systemeffizienz von Variante 1 und Variante 3 ist gut, bzw. sehr gut aufgrund des Temperaturniveaus des Verteilnetzes. In der Variante 3 kann die VL-Temperatur je Gebäude minimiert werden, wodurch die Effizienz der WP-Anlagen steigt.

Die zu installierende Anlagentechnik ist für jede der Varianten hoch. Variante 1 hat den Vorteil, dass nur 2 WP-Anlagen im gesamten Quartier installiert werden, und somit die Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR-Technik) der Umweltwärmequellen und der Wärmepumpen in zwei Punkten gebündelt ist. Dadurch ist der Aufwand für Betrieb und Wartung geringer gegenüber Variante 2 und 3 abzuschätzen. Aufgrund des Effektes, dass in einem Quartier mit mehreren hundert Nutzern nicht jedes Gebäude gleichzeitig die maximale Wärmeleistung benötigt, kann ein Wärmeerzeuger, der ein gesamtes Quartier versorgt kleiner dimensioniert werden, als die Summe aller Hausanschlussleistungen. Dieser Effekt wird als Gleichzeitigkeit bezeichnet und ist auf statistisch verteilte Effekte wie Leerstand und unterschiedliche Nutzerverhalten zurück zu führen.

Aufgrund der Gleichzeitigkeit kann folglich die Versorgungsleistung der zentralen Wärmepumpenanlage in Variante 1 kleiner dimensioniert werden, als die Summe der Versorgungsleistungen der dezentralen Wärmepumpenanlagen in Variante 2 bzw. 3. Die Investitionskosten werden hierdurch reduziert. Des Weiteren ist die Bereitstellung der nötigen Gebäudesubstanz zum Errichten vieler kleiner Energiezentralen meist deutlich höher als für wenige Große. Zur gesamtheitlichen Betrachtung des Beitrags der Geothermie zum EE-Anteil in der Wärmeversorgung ist in der vorliegenden Variantengegenüberstellung der EE-Anteil der Fernwärme einzubeziehen. Diese Betrachtung hat die Entscheidung für eine Vorzugsvariante finalisiert.

Gemäß Angaben der enviaTherm (Fernwärmeversorger) wird durch verschiedene Maßnahmen der erneuerbare Energieanteil im Fernwärmenetz deutlich angehoben. Der Anteil erneuerbarer Energiequellen in der Fernwärme soll im Jahr 2030 30 % betragen und anschließend weiter ansteigen. Die Deckung des Mindest-EE-Anteils, gemäß BEW, von 75 % kann bereits folgendes Wärmenutzungsszenario erfüllen (Tabelle 32).

Tabelle 32: Bahnhofsvorstadt: Erfüllungsszenario 75 % EE mit Fernwärme

Wärmequelle	Anteil Wärmemenge	Anteil EE
Fernwärme	36 %	30 %
Wärmepumpe	64 %	100 %
Gesamt	100 %	75 %

Ein geringerer Bedarf an Wärme aus Wärmepumpen auf Basis von Geothermie führt zur deutlichen Reduktion der Investitionskosten, was eine realistischere Umsetzung ermöglicht. Die Variante 1 wurde mit den in Tabelle 32 abgebildeten Szenario als Vorzugsvariante ausgewählt.

9.5.6 Bedarfslastgang-Erstellung der Vorzugsvariante

Die Bedarfsermittlung soll im Ergebnis Stundenlastgänge für den Wärmebedarf und den Regenerationsbedarf liefern. In Anlehnung an die Bedarfsermittlung aus Kapitel 8.1.3 wird auf das Beispielgebiet Bahnhofsvorstadt eine leicht abgewandelte Methodik verwendet, um Lastgänge zu generieren. Als Ergebnis der Lastgang-Erstellung ist am Ende des Kapitels beispielhaft der Wärmebedarfs-Lastgang des Teilgebiets Ost in Abbildung 120 dargestellt.

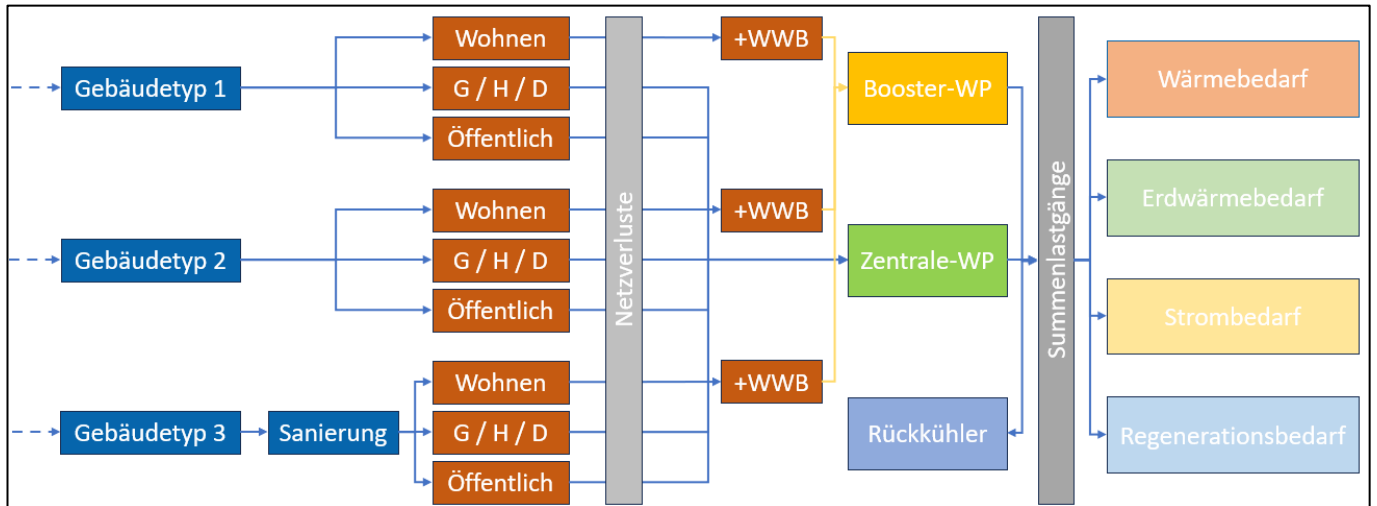


Abbildung 119: Methodik typenweise Lastgangerstellung für Wärme und Elektrizität

Als erstes werden für jeden Gebäudetyp (Wohnen/ Gewerbe/ Öffentlich) Lastgänge für den Heizwärmebedarf generiert (Abbildung 119). Grundlage dafür sind die perspektivischen Heizwärmebedarfe als Jahressumme (siehe Kapitel 9.4.2) und die Heizlast, welche unter Annahme einer Gleichzeitigkeit (GLZ) je Gebäudetyp berechnet wurde.

Tabelle 33: Jahressummen zur Lastganggenerierung

		W	G	Ö	Summe
Gleichzeitigkeiten		0,65	1	1	
Ost	Energiebezugsfläche [m ²]	33.405	5.313	0	38.718
	Heizwärmebedarf [MWh/a]	1.859	320	0	2.179
	p. Heizlast [kW]	759	240	0	999
West	Energiebezugsfläche [m ²]	24.730	1.233	6.355	32.318
	Heizwärmebedarf [MWh/a]	1.505	96	957	2.558
	p. Heizlast [kW]	826	106	733	1.665
Süd	Energiebezugsfläche [m ²]	19.022	5.045	0	24.067
	Heizwärmebedarf [MWh/a]	1.157	284	0	1.441
	p. Heizlast [kW]	643	189	0	832
Gesamt-Gebiet	Energiebezugsfläche [m ²]	77.158	11.590	6.355	95.103
	Heizwärmebedarf [MWh/a]	4.521	700	957	6.178
	p. Heizlast [kW]	2.227	535	733	3.495

Im zweiten Schritt erhalten Wohngebäude zusätzlich einen Warmwasserbedarfslastgang, welcher auf 20 kWh/(m²·a) angenommen wird. Eine zentrale WP stellt die Wärme für ein Wärmenetz bereit. Diese werden mit Netzverlusten beaufschlagt. Die Booster-WP ist für den Temperaturhub von Netzvorlauf-Temperatur auf WWB-Niveau zuständig. In der letzten Stufe resultieren Jahreslastgänge für den Erdwärme- und Strombedarf der Wärmepumpen, die den gesamten Wärmebedarf decken. Parallel werden die Rückkühlerlastgänge zur Regeneration des Erdwärmesondenfeldes simuliert, deren Erzeugung von den Betriebsstunden der zentralen WP abhängt.

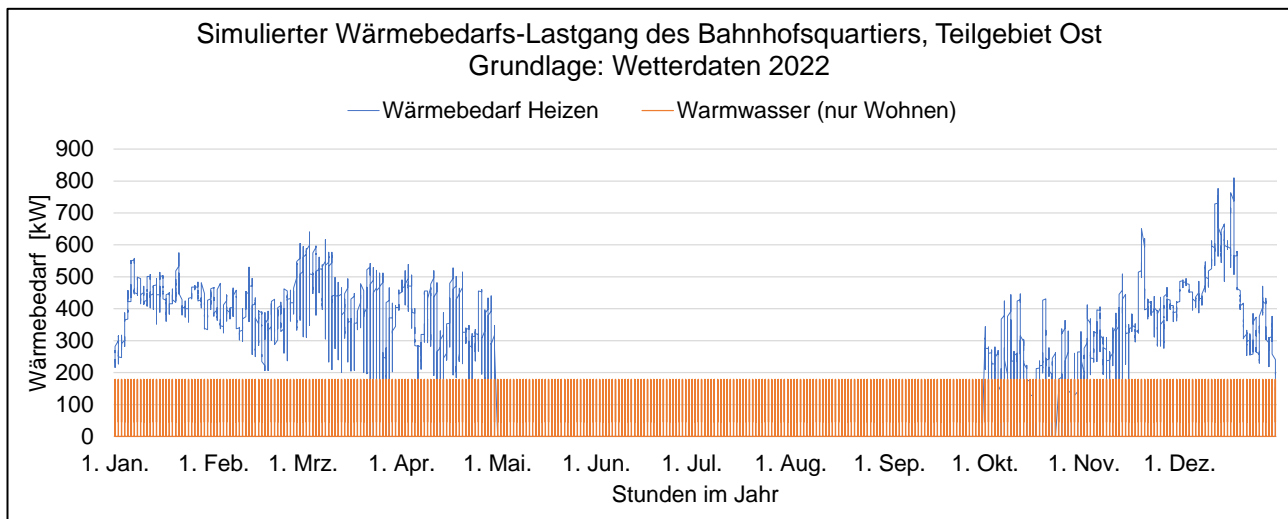


Abbildung 120: Simulierter Wärmebedarfs-Lastgang des Bahnhofsviertels, Teilgebiet Ost

Auf Basis der ermittelten Bedarfslastgänge kann im Folgenden die geothermische und technische Dimensionierung erfolgen.

9.6 Geothermische Dimensionierung

9.6.1 Geothermische Randbedingungen

Die geothermischen Eigenschaften des Untergrundes sind für jeden Standort spezifisch und können auch kleinräumig signifikant variieren. Die Gesteinseigenschaften werden durch verschiedene Parameter beeinflusst, wobei besonders Wassergehalt, Grundwasserfluss, Dichte und regionale Unterschiede als Einflussfaktoren zu nennen sind. Da im Rahmen des Forschungsprojektes kein Thermal Response Test (TRT) zur Bestimmung der Untergrundeigenschaften am Standort durchgeführt wurde, werden diese mithilfe vorhandener Daten für verschiedene Tiefen ermittelt. Die dafür verwendete Vorgehensweise wird im Folgenden dargestellt.

9.6.1.1 Untergrundtemperatur

Für die geothermische Dimensionierung wurde ein 1D-Modell der Temperaturentwicklung mit der Tiefe für die umliegenden Beispielgebiete (rund um die Stadt Plauen) erstellt (siehe Kapitel 4.2.3). Die Tabelle

34 zeigt die durchschnittlichen Temperaturen der Gesteinsumgebung für Tiefenstufen von 50 bis 400 m mit einer Schrittweite von 50 m.

Tabelle 34: Temperaturprofil des Beispielgebiets Bahnhofsvorstadt gemäß dem konstruierten linearen 1D-Modell

Tiefe	50 m	100 m	150 m	200 m	250 m	300 m	350 m	400 m
q_{geo} [mW/m ²]	45							
λ_{eff} [W/(m·K)]	2,0							
Mitteltemperatur [°C]	9,6	10,1	10,7	11,3	11,8	12,4	12,9	13,5

9.6.1.2 Wärmeleitfähigkeit

Das geothermische Modell des Beispielgebietes Bahnhofsvorstadt weist nur geringe vertikale und horizontale Schwankungen auf. Der resultierende repräsentative Mittelwert liegt im gesamten Modellgebiet mit minimalen Abweichungen bei ca. 2,0 W/(m·K). Der Grund für den hohen Grad an Homogenität ist der monotone Charakter der geologischen Umgebung im Beispielgebiet. Die Homogenität des Modells wird durch die Statistik der Wärmeleitfähigkeitswerte für verschiedene Ebenen (Tabelle 35, Abbildung 121) deutlich. Ein TRT wurde im südlichen Teil des Beispielgebiets durchgeführt. Das Ergebnis des Tests wurde verwendet, um die korrekte Simulation des Wärmeleitfähigkeitswertes zu überprüfen. Die Modellwärmeleitfähigkeit entspricht nahezu dem gemessenen Wert der effektiven Wärmeleitfähigkeit von 2,05 W/(m·K).

Tabelle 35: Mittelwerte, Minima und Maxima der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Tiefenstufen im Beispielsgebiet Bahnhofsvorstadt

Tiefe	50 m	100 m	150 m	200 m	250 m	300 m	350 m	400 m
	effektive Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]							
Mittelwert	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Min	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Max	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

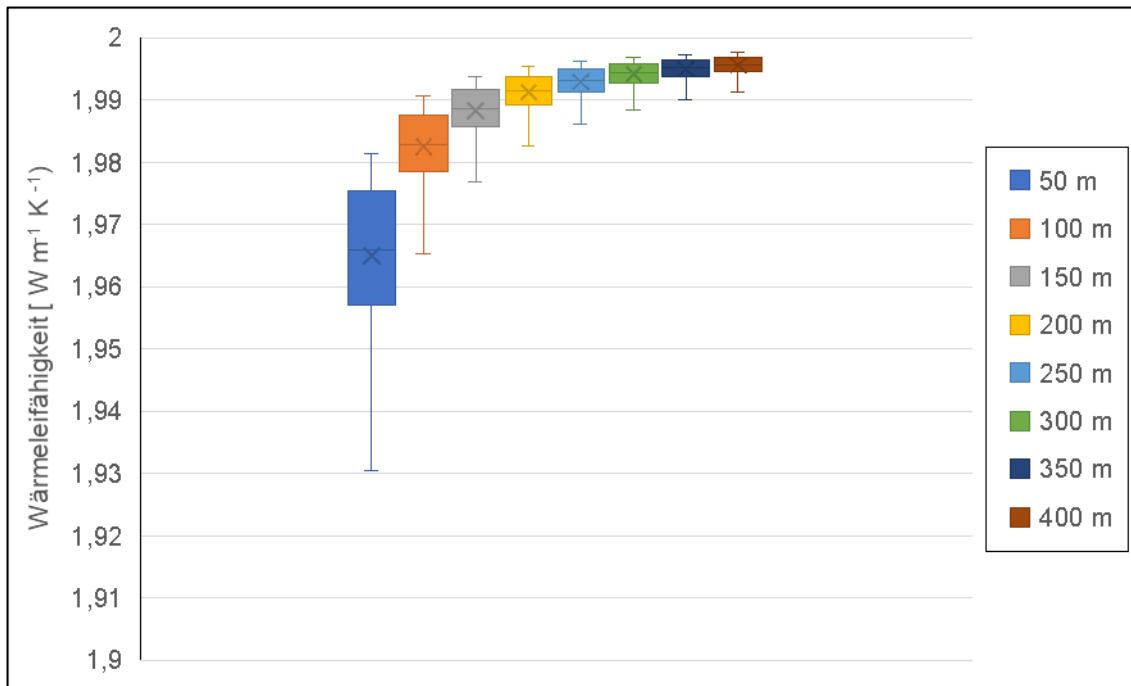


Abbildung 121: Verteilung der Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Tiefenstufen im Beispielsgebiet Bahnhofsvorstadt

9.6.2 Simulationsrandbedingungen

Die Simulation wurde mit der Software EED durchgeführt. Als Grundlage der Berechnungen werden die zuvor ermittelten Untergrundparameter sowie die haustechnischen Randbedingungen betrachtet und standortspezifisch optimiert. In der Dimensionierung wurde eine laminare Durchströmung der Sonden von 0,45 l/s als konservative Betrachtung angenommen.

Für die Simulationsberechnungen sind neben dem Bohrungsdesign (wie Bohrlochdurchmesser und Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials) vor allem die Grenztemperaturen des Sondenfluids entscheidend. Diese Temperaturen werden im verwendeten Simulationsprogramm als Durchschnitt zwischen Vor- und Rücklauf mit einer Differenz von 3 K berechnet. Im Grundlastfall wird gemäß VDI 4640-2 eine minimale Sondenfluidtemperatur von 0 °C im Vorlauf angesetzt, was zu einer mittleren Grenztemperatur von 1,5 °C im Programm führt. Im Spitzenlastfall gilt die Vorgabe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), dass im 50. Betriebsjahr ein Absinken der mittleren Fluidtemperatur (Durchschnitt aus Vor- und Rücklauf) unter -1,5 °C verhindert werden muss.

Aufgrund der geplanten tatsächlichen Sondenanordnung wurde im Simulationsprogramm die Funktion „irregular configuration“ gewählt, da diese von einem regelmäßigen Raster abweicht. Im Programm werden die tatsächlichen Positionen der Bohrungen eingelesen und programmintern durch die Variation von Anordnung, Abstand und Sondenanzahl die beste Näherung an eine im Programm hinterlegte, regelmäßige Konfiguration errechnet. Daraus ergibt sich das folgende regelmäßige Raster,

welches den im Lageplan eingetragenen Positionen entspricht. Die Optimierung des Sondenfeldes geschieht iterativ. Der mittlere Sondenabstand des Gesamtsondenfeldes beträgt 12,9 m.

9.6.3 Dimensionierungsergebnisse

Entsprechend der ermittelten Bedarfswerte des Quartiers Bahnhofsvorstadt wurden geothermische Dimensionierungen durchgeführt. Die in Kapitel 9.3.2 beschriebene Clusterung des Gebiets wurde dabei beachtet. Der Bereich Süd weist dabei den geringsten Bedarf bei hoher Platzverfügbarkeit für Sonden auf, wobei Ost einen hohen Energiebedarf bei niedrigerer maximaler Sondenanzahl besitzt. Es wurden Berechnungen für eine monovalente und eine bivalente Versorgung des Quartiers angestellt und in schrittweisem Austausch eine Vorzugsvariante präzisiert. Die Ergebnisse stellen die erdseitige Entzugsleitung dar.

Aufgrund der Unterschiede zwischen Bedarfswerten und maximal positionierbaren Sonden der drei Gebiete wurden die Berechnungen des Gesamtsondenfeldes mittels Einzelfeldsimulation gegengeprüft. Die Abdeckung des Eigenbedarfs im Gebiet Süd kann mit den platzierbaren Sonden vollständig erfolgen, jedoch sind die Sonden des Gebiets Ost nicht zur Abdeckung des eigenen Bedarfs ausreichend. Um die Abdeckung des Gesamtbedarfs nicht zu sehr von dem Sondenfeld Süd abhängig zu machen, wurde der Anteil von Sonden und Bedarf der jeweiligen Gebiete ermittelt. Aus diesem Grund reduzieren sich die Gesamtsonden in einigen Varianten obwohl keine Gesamtabdeckung erreicht wurde.

Die Dimensionierungsergebnisse zeigen, dass der Energiebedarf des Gesamtsondenfeldes ohne Regeneration des Untergrundes bei Bohrtiefen von 200 m, 300 m und 400 m nicht vollständig abgedeckt werden kann (vgl. Tabelle 36). In weiteren Dimensionierungsschritten wurde die Regeneration des Untergrundes mit einem Anteil von 50 % des Energiebedarfs betrachtet. Bei insgesamt 364 Erdwärmesonden im Gebiet Bahnhofsvorstadt können mit einer Länge von je 300 m so 75 % des Gesamtbedarfes gedeckt werden (vgl. Tabelle 37). Bei einer Sondentiefe von 312 m bei 484 Sonden kann der Gesamtbedarf des Quartiers mit 50 %-iger Regeneration abgedeckt werden (vgl. Tabelle 37).

Tabelle 36: Dimensionierungsergebnisse des Sondenfeldes Bahnhofsvorstadt für verschiedene Tiefenstufen ohne Regeneration für eine monovalente Energieversorgung

Sondenlänge	200 m	300 m	400 m
Sondenanzahl	512	512	484
Gesamtbohrmeter [m]	102.400	153.600	193.600
Abdeckung [MWh/a]	3.478	4.862	1.885
Anteil Abdeckung [%]	57%	80%	91%

Tabelle 37: Dimensionierungsergebnisse des Sondenfeldes Bahnhofsvorstadt bei 300 m, 50 %-ige Regeneration, monovalente Energieversorgung

Sondenlänge + Regenerationsanteil	300 m + 50 % Reg	312 m + 50 % Reg
Sondenanzahl	364	484
Gesamtbohrmeter [m]	109.200	151.008
Abdeckung [MWh/a]	4.550	6.252
Anteil Abdeckung [%]	75 %	100 %

Auf Grundlage der vorangegangenen Ergebnisse wurden die Anforderungen an die geothermische Anlage präzisiert und der Lastgang aktualisiert. Mit diesem Lastgang, für eine bivalente Energieversorgung, wurde eine erneute Dimensionierung durchgeführt, welche aufgrund der Anforderungen für Fördermaßnahmen eine 75 %-ige Abdeckung aufweisen sollte. Im Ergebnis zeigt sich, dass 297 Erdwärmesonden mit je 300 m Tiefe für eine Abdeckung von 3.923 MWh/a erforderlich sind, wenn eine Regeneration von 50 % erfolgt (siehe Tabelle 38). Diese Ergebnisse dieser Berechnung wurden für die weiteren Schritte verwendet.

Tabelle 38: Dimensionierungsergebnisse des Sondenfeldes Bahnhofsvorstadt bei 300 m, 50 %-ige Regeneration, bivalente Energieversorgung

Sondenlänge + Regenerationsanteil	300 m + 50 % Reg
Sondenanzahl	297
Gesamtbohrmeter [m]	89.100
Abdeckung [MWh/a]	3.923
Anteil Abdeckung [%]	75 %

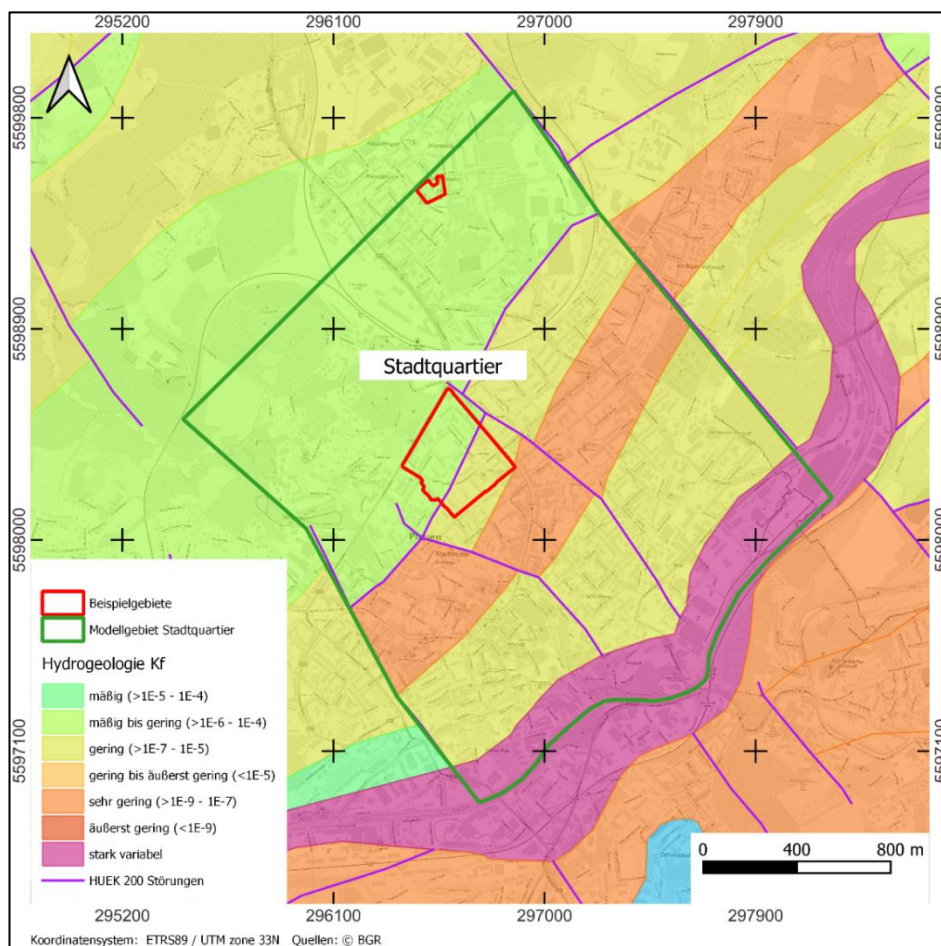
9.6.4 3D-Thermohydrodynamische Modellierung

Zur Abbildung der thermischen Auswirkungen der Anlagen auf den Untergrund bzw. die Nachbarschaft, wurde ebenso für Bahnhofsvorstadt eine 3D-thermohydrodynamische Modellierung mittels der Software FEFLOW (© DHI-WASY) durchgeführt. Ziel der Simulation ist die Darstellung gegenseitiger, thermischer Beeinflussung von benachbarten Erdwärmesondenfeldern. Dazu werden unterschiedliche energetische Varianten je Subsondenfeld betrachtet (Tabelle 39). Dabei soll der Unterschied der thermischen Beeinflussung für verschiedene Regenerationsanteile aufgezeigt werden. Für die Berechnungen wurde der Lastgang der monovalenten Versorgung und die Sondenpositionen aus der Dimensionierung der Einzelfelder verwendet. Alle Sonden weisen eine Bohrtiefe von 300 m auf.

Tabelle 39: Energetische Randbedingungen der Subsondenfelder.

	Ost	West	Süd
	50 % Regeneration	Nur Heizen	Thermisch ausgeglichen
Heizarbeit [MWh/A]	1825,01	2177,0	1575,7
Regenerationsarbeit [MWh/a]	911,42	0,0	1575,7
Anzahl Sonden	103	207	122

Grundlage bildet das geologische 3D-Modell des Untergrundes, welches im Rahmen des Forschungsprojektes GeoPLASMA-CE erstellt wurde. Entlang der ausgewiesenen Störungen in der HUEK200 wurde ein Modellgebiet mit einer Größe von ca. 4,2 km² abgesteckt (siehe Abbildung 122). Allerdings werden die hydrogeologischen Störungen innerhalb des Modellgebietes vernachlässigt. Es werden die Schichtgrenzen aus dem 3D-Modell GeoPLASMA-CE übernommen, welche im Bereich der Bahnhofvorstadt verbreitet sind. Terrassensedimente im Bereich der Oberflächengewässer werden aufgrund deren Entfernung vernachlässigt. Diese Vereinfachung ist zulässig, da die Geologie am Standort maßgeblich die Temperaturentbreitung durch den Betrieb der Erdwärmesondenfelder bestimmt.



Quelle: BGR, 2013A

Abbildung 122: Abgrenzung für das Modellgebiet Stadtquartier Bahnhofvorstadt.

Das 3D-Modell besteht aus 2 Modelleinheiten (Tabelle 40). Denen werden hydrogeologische und geothermische Eigenschaften zugeordnet (Tabelle 41). Anhand der Angaben für die effektive Wärmeleitfähigkeit und die effektive vol. Wärmekapazität in Tabelle 41 lassen sich über die Schichtmächtigkeiten gemittelte Werte ableiten. Für die Simulation wird ein konservativer und hinreichend genauer Modellansatz gewählt, bei dem die ungestörte Untergrundtemperatur von 12,4 °C bis zur Geländeoberfläche extrapoliert wird. Die thermischen Parameter und Randbedingungen stimmen mit den Angaben in der EED-Dimensionierung überein. Im Modell wird keine Grundwasserströmung berücksichtigt.

Tabelle 40: Stratigrafische und lithologische Gliederung des Modells Bahnhofsvorstadt und zugeordnete Modellkörper.

Schichtname GeoPLASMA-CE	Petrografie	Mächtigkeit an Sonde [m]	Modelleinheit
anthropogenic fillings	Aufschüttung	3	1
wrench and thrust unit	Schiefer, Kalkstein	297	2

Tabelle 41: Hydrogeologische und geothermische Eigenschaften der Modelleinheiten für das Modell Bahnhofsvorstadt.

Petrografie	hydrogeologische Eigenschaften			thermische Eigenschaften	
	hydraulische Einheit	kf-Wert (horizontal) [m/s]	nutzbare Porosität	Wärmeleitfähigkeit [W/m·K] (eff.)	vol. Wärmekapazität [MJ/m ³ ·K] (eff.)
Anthropogene Auffüllungen	GGL	1,0E-05	0,1	1,0	2,2
Schiefer, Kalkstein	Kluft-GWL	1,0E-08	0,05	2,0	2,5

Das 3D-Modell und die Einteilung in 2 Modelleinheiten ist Abbildung 123 zu entnehmen. Ebenso wird ersichtlich, dass im Bereich der Sonden für die Rechengenauigkeit eine feinere Diskretisierung der Vermaschung umgesetzt wurde. Dabei wurden die Vorgaben des Softwareherstellers DHI-Wasy beachtet. Das 3D-Modell erstreckt sich vertikal über insgesamt 370 m. Die zwei Modelleinheiten werden aus rechen-technischen Gründen im Modell weiter unterteilt, um geringere Mächtigkeiten zu erhalten. Somit können Übergänge zwischen den unterschiedlichen hydraulischen und thermischen Parametern besser abgebildet und numerische Stabilität gewährleistet werden.

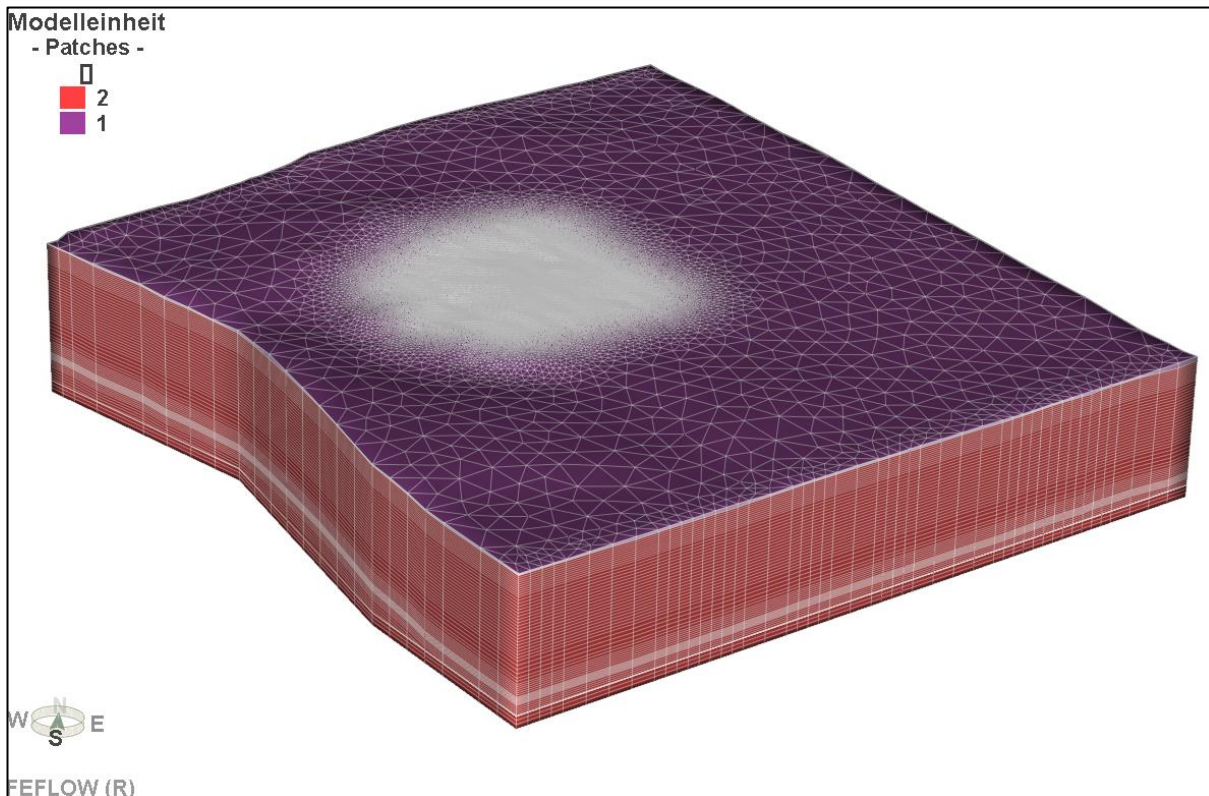


Abbildung 123: 3D-Darstellung des Modells Bahnhofvorstadt mit Darstellung der Modell-Layer.

In Abbildung 124 sind die simulierten Fluidtemperaturen für die drei Sondenfelder für das Beispielgebiet Bahnhofvorstadt dargestellt. Im FEFLOW kann lediglich die Temperatur für den Grundlastbetrieb dargestellt werden, da die energetischen Randbedingungen anhand von Monatscheiben implementiert wurde. Eine stündliche Berechnung wäre in FEFLOW aufgrund des hohen Bedarfs an Rechenzeit und Speicherplatz nicht zielführend.

Da das Sondenfeld Süd mit einer energetisch ausgeglichenen Bilanz zwischen Heizen und Kühlen bzw. Regeneration betrieben wird, schwankt die Fluidmitteltemperatur annähernd um die ungestörte Untergrundtemperatur als Mittelwert. Aufgrund gegenseitiger Beeinflussung durch die Nachbaranlagen findet eine geringfügige Abkühlung im Bereich des Sondenfeldes Süd statt. Für die Sondenfelder Ost und West ist generell eine Abkühlung im Sondenfeld zu verzeichnen. Für das Sondenfeld Ost wird bereits nach 30 Jahren die untere Temperaturgrenze von 1,5 °C für den Grundlastbetrieb unterschritten. Für das Sondenfeld West erfolgt eine Unterschreitung nach dem 39. Betriebsjahr. Eine Abweichung der mittleren Fluidtemperaturen aus dem EED lässt sich mit der gegenseitigen Beeinflussung der Sondenfelder sowie der unterschiedlichen energetischen Auslegung begründen. Dies wird in der Darstellung der Temperaturfahnen deutlich. Der Unterschied zwischen der maximalen Sondenanzahl eines Gebietes und dessen Energiebedarf wurde für die im FEFLOW durchgeführten Simulation nicht optimiert da der Fokus auf der Darstellung der nachbarschaftlichen Beeinflussung lag.

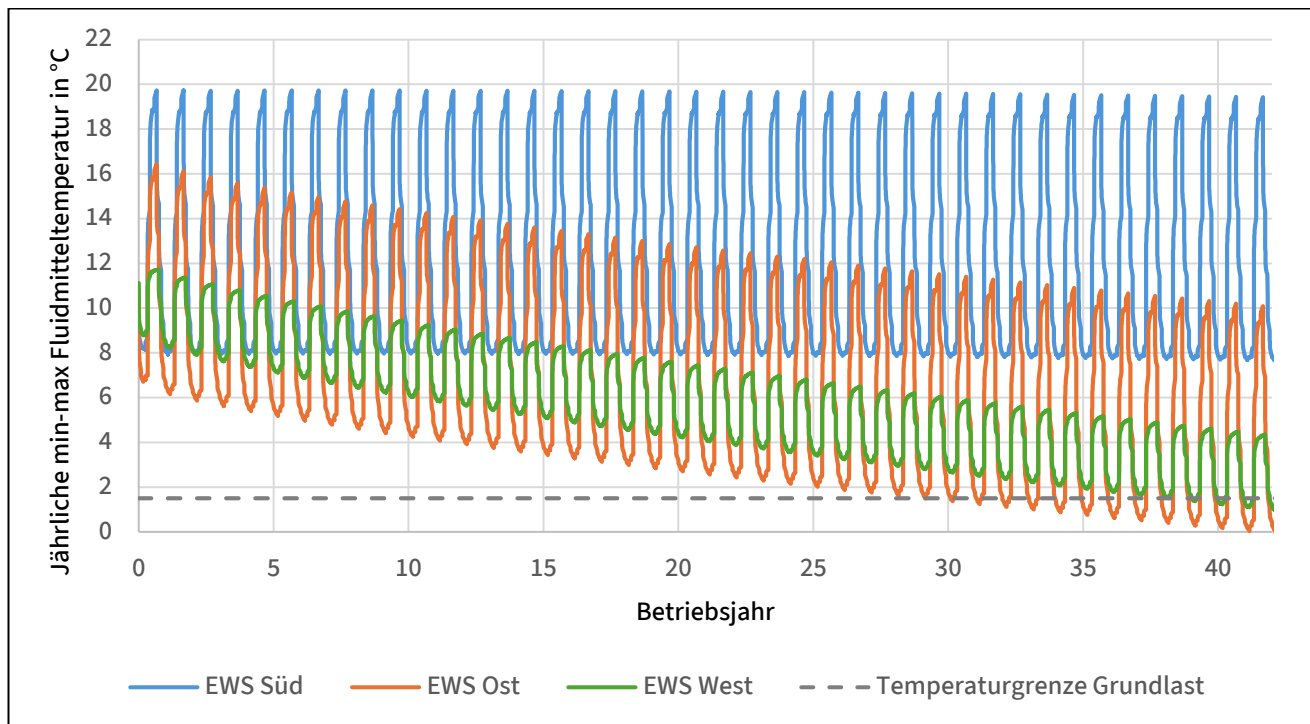


Abbildung 124: Entwicklung der mittleren Sondenfluidtemperatur für die Subsondenfelder der Bahnhofsvorstadt. Dargestellt ist die Mittelung aus Vor- und Rücklauf für die Gesamtanlage.

Es erfolgt eine Auswertung der Temperaturfahne für das 30. Betriebsjahr, da ab diesem Zeitraum die Fluidtemperaturen von Sondenfeld Ost die Temperaturgrenze von 1,5 °C im Grundlastbetrieb unterschreiten.

Für das Sondenfeld Süd ist deutlich zu erkennen, dass die Planung der Anlage in einer thermischen Balance zwischen Wärmeeintrag und Wärmeentzug dazu führt, dass sich lediglich saisonal Temperaturfahnen ausbreiten und keine generelle signifikante Aufheizung oder Abkühlung stattfindet. Vom Sondenfeld gehen dabei wellenartig Wärme- und Kältefahnen aus, welche sich mit geringer Distanz vom Feld entfernen.

Aufgrund der heizlastigen Energetik der beiden Sondenfelder Ost und West findet in deren Bereich eine Abkühlung des Untergrundes statt. Da ein Eintrag von Regenerationswärme in den Untergrund für das Sondenfeld Ost vorgesehen ist, werden geringere Temperaturunterschiede zur ungestörten Untergrundtemperatur simuliert als für das Sondenfeld im Westen. Aufgrund der Nähe der Sondenfelder untereinander, bildet sich im nördlichen Bereich der Bahnhofsvorstadt eine gemeinsame Temperaturfahne um beide Sondenfelder aus.

Die Temperaturfahne der Sondenfelder Ost und West reichen bis in den nördlichen Teil des südlichen Sondenfeldes. Aufgrund dieser Beeinflussung kommt es zu einer geringfügigen Abnahme der mittleren Fluidtemperatur über den Betriebszeitraum.

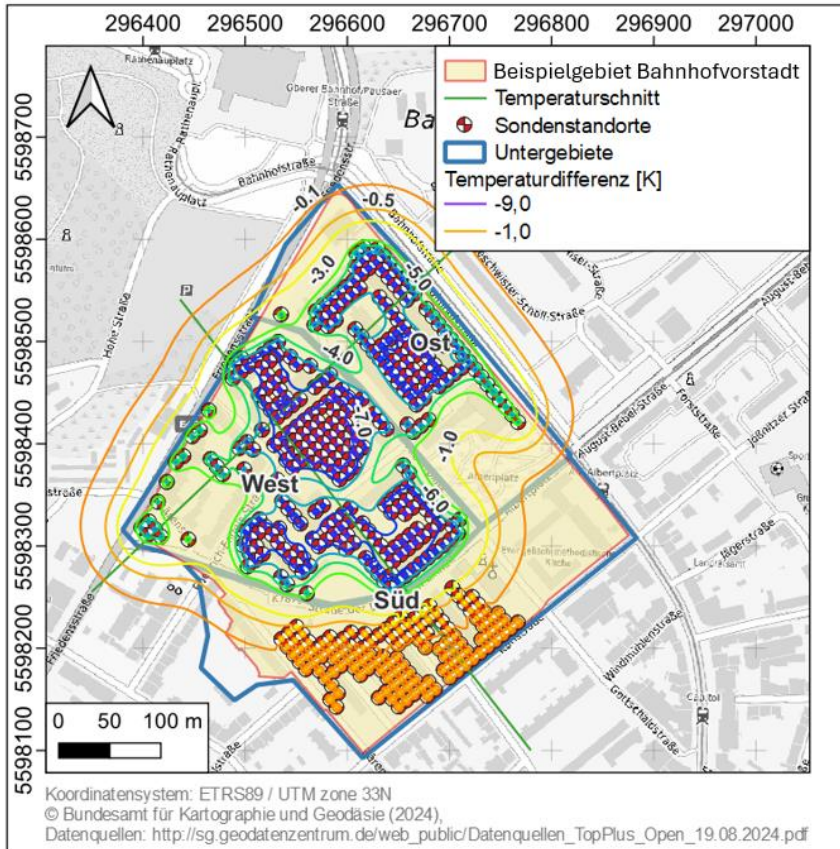


Abbildung 125: Isolinien der Temperaturdifferenz im 30. Betriebsjahr für das Modell Bahnhofsvorstadt.

Die Simulation im 3D-Modell für die Bahnhofsvorstadt zeigt zudem, dass EED bei der Planung von Sondenfeldern ganzer Quartiere an seine Grenzen kommt. Zum einen ist EED in seiner maximalen Anzahl an Sonden sowie deren Anordnung begrenzt. Zum anderen können keine Aussagen zur räumlichen thermischen Beeinflussung getroffen werden. Bei der einzelnen Betrachtung von nahegelegenen Subsondenfeldern kann es somit zur Unterdimensionierung kommen und die ermittelte Sondenanzahl wäre für die Deckung des Heizbedarfs nicht ausreichend. Eine Simulation im 3D-Modell soll demnach bei der Auslegung großer Sondenfelder als obligatorisch betrachtet werden.

Weiterhin wird in den Ergebnissen deutlich, dass die Planung der Sondenfelder in einer energetischen Balance Voraussetzung für eine langfristige und nachhaltige Nutzung des oberflächennahen Untergrundes ist. Auf diese Weise wird der Untergrund als Speicher genutzt. Die thermische Beeinflussung beschränkt sich auf den Nahbereich des Sondenfeldes. Eine Beeinflussung nachbarschaftlicher Grundstücke oder Erdwärmesondenfelder ist nicht zu erwarten.

9.7 Technische Dimensionierung

Im Kapitel 9.5.5 wurde zunächst eine Vorzugsvariante aus der Variantenerstellung ermittelt. Im Folgenden wird die technische Dimensionierung der Vorzugsvariante (Variante 1) vorgenommen.

Wärmeerzeuger und Anlagentechnik

Unter Berücksichtigung von Gleichzeitigkeiten wird im Quartier eine Heizlast von 3,5 MW berechnet. Die geothermisch betriebenen Wärmepumpen (WP) stellen dem Quartier Wärme zur erneuerbaren Wärmeversorgung zur Verfügung. Zur Erreichung des erneuerbaren Wärmeanteils von mindestens 75 % gemäß BEW, und unter Berücksichtigung eines EE-Anteils von 30 % der FW; müssen mindestens 64 % der Wärmeversorgung von WP hergestellt werden (siehe Kapitel 9.5.5).

Auf Basis einer Lastgangsimulation wurde ermittelt, dass zur Erfüllung des Wärmepumpen-Anteils die Heizleistung der WP-Anlagen mindestens 900 kW betragen muss. Um Flexibilität im Regelungsprozess zur ermöglichen, wird die Heizleistung der WP-Anlagen auf 1.200 kW dimensioniert.

Des Weiteren wird der Fernwärmeanschluss auf 2.600 kW zur Deckung der Heizlast dimensioniert. Enthalten sind in dieser Dimensionierung eine Mindestleistung von 2.300 kW und eine Redundanz von 300 kW.

Die Einspeisung der Fernwärme erfolgt vollständig in der Energiezentrale (EZ) Tischendorfstraße. Die Wärmepumpenleistung wird auf die EZ Tischendorfstraße und EZ Karlstraße aufgeteilt. Hintergrund ist, eine gleichmäßigere Ausnutzung des geothermischen Potenzials im Quartier zu ermöglichen. Durch die Errichtung der EZ Karlstr. können die geothermischen Erträge im Teilgebiet Süd erschlossen, vor Ort in Heizwärme aufbereitet und ohne lange Transportwege dem Verbraucher zur Verfügung gestellt werden.

Zur Maximierung der WP-Laufzeit wird von mindestens drei WP je Energiezentrale ausgegangen. Die Mindest-Dimensionierung der Pufferspeicher wird auf eine minimale Wärmepumpenlaufzeit der kleinsten WP je Anlage von 20 min ausgelegt. Die angenommene Spreizung über den Speicher beträgt 5 K.

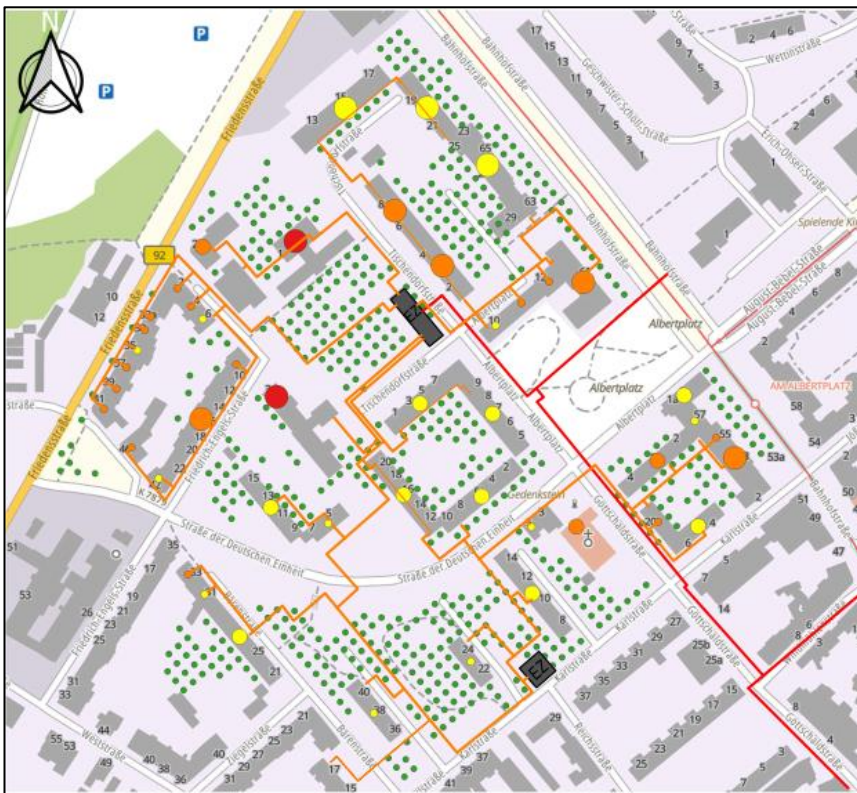
Die Ergebnisse der Dimensionierung der Anlagenkomponenten je Energiezentrale sind in Tabelle 42 dargestellt.

Tabelle 42: Variante 1: Dimensionierung der Komponenten je Energiezentrale

	EZ Tischendorfstraße	EZ Karlstraße
Soll-Heizleistung [kW]	3.000	500
Redundanz [kW]	300	
Fernwärme-Anschlussleistung [kW]	2.600	
Ges-WP-Leistung [kW]	700	500
Anzahl WP	3	3
Einzel-WP-Leistung [kW]	233	167
Min-Laufzeit WP [h]	0,33	0,33
Ges-Speichervolumen [m³]	13	9

Wärmenetz

Parallel zur Prüfung des Bestands-Netzes in Kapitel 9.5.2 wird der Neubau eines NT-Netzes untersucht. Die Streckenführung wird analog zum Bestands-FW-Netz vorgenommen. In der Abbildung 126 ist das NT-Netz in orange dargestellt. Es verläuft von der Energiezentrale Tischendorfstraße im Norden und von der Energiezentrale Karlstraße im Süden zu den Verbrauchern. In rot ist das Primärnetz der Fernwärme eingezeichnet, welches via Energiezentrale Tischendorfstraße Wärme in das NT-Netz zusätzlich zu den WP einspeist.



Quelle: OSM, 2024

Abbildung 126: Bahnhofsviertel: NT-Netz (orange) inkl. FW-Anbindung (rot)

Grundlage zur Dimensionierung des NT-Netzes sind die Hausanschlussleistungen der Gebäude, eine Spreizung zwischen Vorlauf und Rücklauf von 15 K, sowie maximale Druckverluste von 200 Pa/m.

Hochgedämmte Rohre eignen sich besonders zum Einsatz in NT-Netzen, da diese aufgrund der heizungsseitigen Betriebsgrenzen nur sehr geringe VL-Temperaturauskühlung tolerieren. Flexible Kunststoffrohre haben den Vorteil einer zügigen und kostengünstigen Installation. Im Beispielprojekt wurde aufgrund dessen ein hochgedämmtes Kunststoffrohr mit Vakuumdämmung gewählt. Ca. 2.700 Trassenmeter sind zur Erschließung des Niedertemperaturnetzes erforderlich. Die Rohrquerschnitte reichen von DN 40 bis DN 160.

Dimensionierung Rückkühler

Die Dimensionierung der Rückkühler erfolgt anhand der Regenerationswärmemenge, die den EWS im Sommerhalbjahr zugeführt werden muss, damit kein degressives Temperaturverhalten über mehrere Nutzungsjahre im Erdreich um die EWS entsteht. Der Dimensionierung liegt der Ansatz zu Grunde, dass die Rückkühler oberhalb einer Außentemperatur von 17 °C eingeschaltet werden. Anhand des Jahreslastganges und den möglichen Betriebsstunden wird eine erforderliche Rückkühlerleistung bemessen. In der Tabelle 43 sind die Ergebnisse dargestellt. Die Gesamtleistung der Rückkühler, die für die Bahnhofsvorstadt dimensioniert wird, beträgt 1.500 kW.

Tabelle 43: Dimensionierung Rückkühlwerke

		Ost	West	Süd	Summe
Regenerationswärmebedarf	MWh/a	717	812	488	2.071
Erf. Leistung RKW	kW	521	590	355	1.466
Dimensionierung RKW	kW	550	600	350	1.500

9.8 Energiebilanz

Die Ergebnisse der Jahreslastgang-Simulation der Bahnhofsvorstadt sind im Energieflussschema in der Abbildung 127 dargestellt. Die Simulation wurde auf Stundenbasis durchgeführt. Die Bedarfslastgänge wurden wie in Kapitel 9.5.6 erläutert, aufgestellt. Anmerkung: Aufgrund von Skalierungseffekten bei der Lastgangerstellung kam es zu geringen Abweichungen zwischen den berechneten Bedarfswerten im Quartierssteckbrief und den Wärmesummen des Bedarfslastganges, welche im Rahmen der Genauigkeit des Rechenmodells vernachlässigbar sind.

Die zentral erzeugte Wärmemenge in den EZ Tischendorfstraße und EZ Karlstraße beträgt in Summe 7.813 MWh. Die WP-Anlagen leisten einen Beitrag von 5.060 MWh und die Fernwärme von 2.753 MWh. Der Wärmepumpenanteil beträgt 64,8 %. Unter der Annahme eines EE-Anteils der FW von 30,0 % wird ein Gesamt-EE-Anteil von 75,3 % erreicht und die Vorgaben des BEW erfüllt.

Zusätzlich zur zentral erzeugten Wärme wird dezentral zur Nacherwärmung des Trinkwassers eine Wärmemenge von 281 MWh eingesetzt.

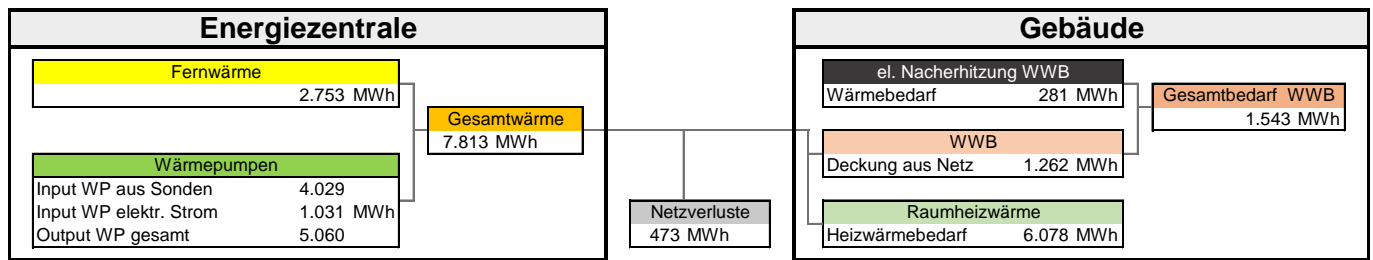


Abbildung 127: Bahnhofsvorstadt: Energieflussschema (Ergebnisse der Simulation)

Die Aufteilung der genutzten Umweltwärmemenge ist in Abbildung 128 dargestellt. Ca. 4.000 MWh Wärme werden aus den Erdwärmesonden entzogen. Die Rückkühlwerke regenerieren 50 % der entzogenen Wärme aus dem Erdreich mit Wärme aus der Luft in Höhe von ca. 2.000 MWh.

Mithilfe des Jahresganges der Quelltemperatur wird eine Jahresarbeitszahl mit JAZ = 4,9 berechnet (exkl. Hilfsstrom).

In Summe wird ein Stromeinsatz für Wärmepumpen und Hilfsstrom von 1.746 MWh berechnet. Ein Abzug durch Stromerzeugung aus PV-Anlagen ist darin nicht enthalten.

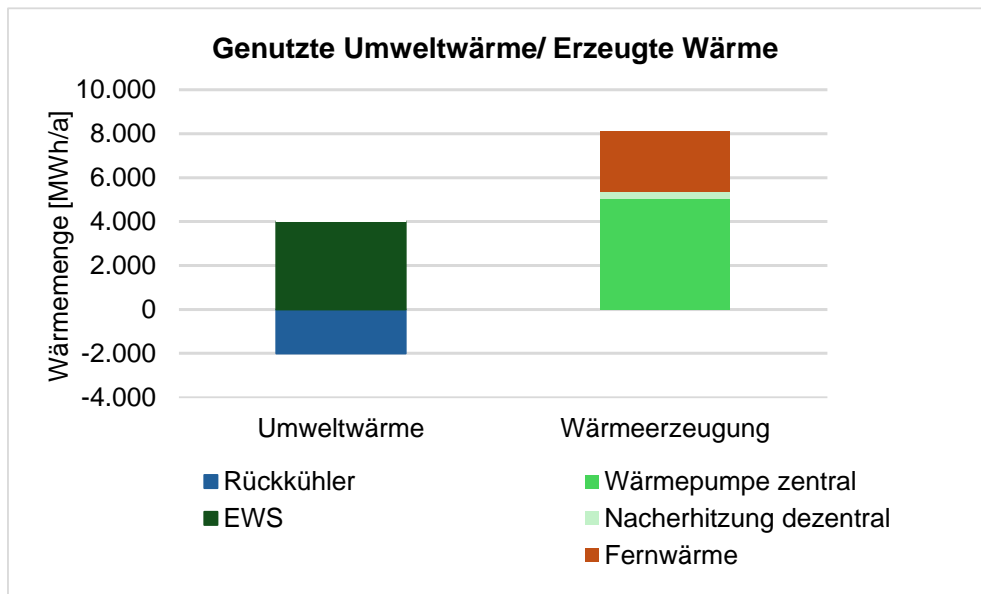


Abbildung 128: Bahnhofsvorstadt: Jahresbilanz genutzte Umweltwärme und erzeugte Wärme

9.9 Investitionskosten

In der Abbildung 129 sind die Investitionskosten der Vorzugsvariante (Variante 1), in netto dargestellt. Die Investitionssumme ohne Berücksichtigung von Förderung beträgt ca. 19,0 Mio. €. Den Hauptanteil nehmen die geothermischen Erdwärmesondenanlagen mit ca. 10,2 Mio. € ein. Die Energiezentralen (inkl. Rückkühler) liegen mit 4,3 Mio. € an zweiter Stelle.

Die Kosten der dezentralen Wärmeerzeugung beinhalten die heizungsseitigen Geräte zur Nacherhitzung zur WWB (Wasser-Wasser-WP), sowie einen Pufferspeicher je Gebäudeeinheit und Kosten für MSR-Technik sowie Rohrleitungsbau (RLB). Nicht enthalten sind Kosten für die WWB selbst (Kosten für Trinkwasserspeicher, Frischwasserstation, etc.). Ebenso nicht enthalten sind Kosten für den Umbau von Hausanschlussstationen (HAST) und Kosten für Umbaumaßnahmen am Rohbau der Heizungsräume.

In der Kostenschätzung für das Wärmenetz wird von einem kompletten Neubau ausgegangen. Es sind der Rohrleitungsbau, inkl. Tiefbaukosten in Form von Erdaushub- und Verfüllungskosten enthalten, aber keine Kosten für Straßenbau berücksichtigt. Wie in Kapitel 9.5.2 untersucht, weist das Bestandsnetz der FW im überwiegenden Gebiet ausreichende Querschnitte zur Nutzung als NT-Netz auf. Es können gegebenenfalls Streckenkapitele weiter genutzt werden, sodass die Kosten für das Wärmenetz sinken können. Die Kosten für Geothermie enthält u.a. die Herstellung der EWS, die Herstellung von Verteilerschächten und Anbindeleitungen inkl. Tiefbau. Wichtig zu berücksichtigen ist, dass in allen aufgeführten Kosten keine Kosten für die obligatorischen, gebäudeseitigen Sanierungsmaßnahmen zum Erreichen des Gebäudetyps 1 bzw. 2 (Niedertemperaturtauglichkeit) enthalten sind, wie z.B. Maßnahmen an der Gebäudehülle, Erweiterung von Heizkörpern/ Heizflächen (siehe Kapitel 9.1.3).

Unter Berücksichtigung der BEW-Förderung, gemäß Modul 2 (siehe Kapitel 7) besteht die Möglichkeit, bis zu 40 % der Investitionskosten für erneuerbare Wärmeerzeuger und Wärmenetze zurückgezahlt zu bekommen. Die erforderliche Investitionssumme kann sich unter der Maßgabe, dass alle förderrelevanten Themenstellungen eingehalten werden, auf ca. 11,6 Mio. € reduzieren.

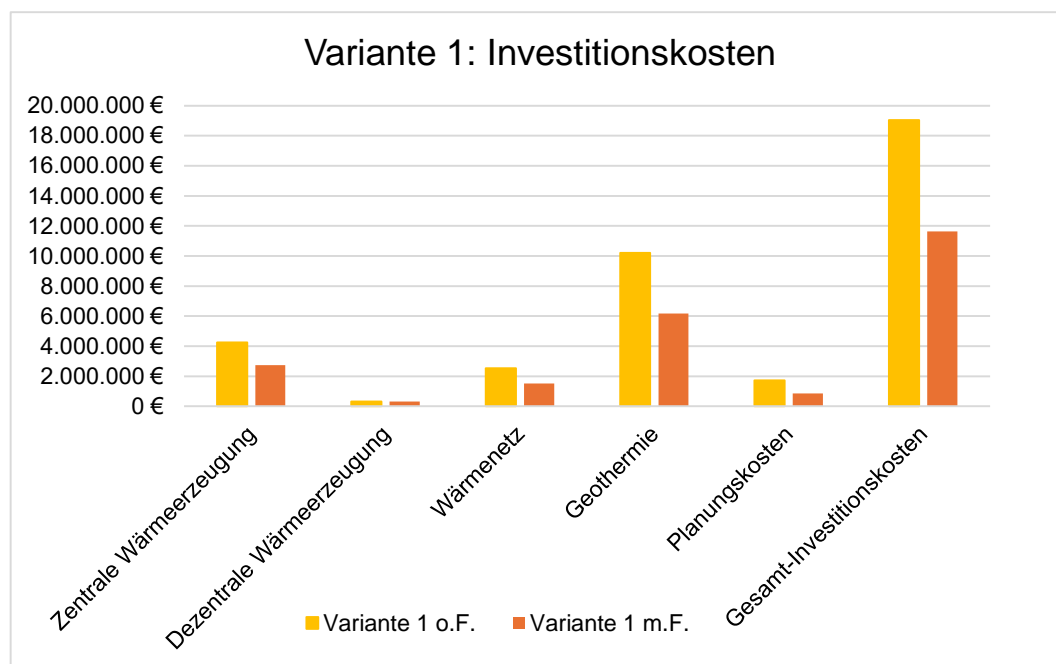


Abbildung 129: Bahnhofsvorstadt: Investitionskosten der Vorzugsvariante (Variante 1) mit und ohne BEW-Förderung, in netto

9.10 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung der Wärmeversorgung erfolgt anhand einer dynamischen Investitionsrechnung nach der Kapitalwertmethode. Cashflows der Zukunft werden dafür abgezinst. Die Annahmen der beeinflussenden Faktoren sind im Kapitel 6.1.4. beschrieben. Eine Auflistung der Berechnungsergebnisse befindet sich in Anhang A 3.2

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird über eine Dauer von 20 Jahren vorgenommen.

Die Investitionskosten wurden im vorangegangenen Kapitel erläutert. Die Betriebskosten setzen sich zusammen aus den Bezügen für Strom (ca. 418.800 €) und Fernwärme (ca. 330.400 €) sowie Kosten für Wartung und Instandhaltung der Anlagenteile (ca. 208.200 €). In Summe betragen die Betriebskosten berechnet für das erste Jahr ca. 1 Mio. €.

Bei Beantragung einer Betriebskostenförderung gemäß BEW, Modul 4, kann der für die ersten 10 Betriebsjahre benötigte Strom zum Betreiben der Wärmepumpen anteilig erstattet werden (siehe Kapitel 7). Dadurch können sich die jährlichen Betriebskosten um ca. 150.000 € reduzieren.

Unter der Maßgabe der erläuterten Annahmen betragen die Gesamtkosten über den Betrachtungszeitraum von 20 Jahren ca. 32,4 Mio. €.

Inklusive einer Förderung für Investitionskosten gemäß BEW, Modul 2 und einer Betriebskosten Förderung gemäß BEW, Modul 4 können die Gesamtkosten über 20 Jahre auf ca. 23,5 Mio. € gesenkt werden (siehe Abbildung 130).

Die Wärmegebungskosten belaufen sich ohne Förderung auf 21,3 Ct/kWh, bzw. auf 15,4 Ct/kWh inklusive der genannten Förderung.

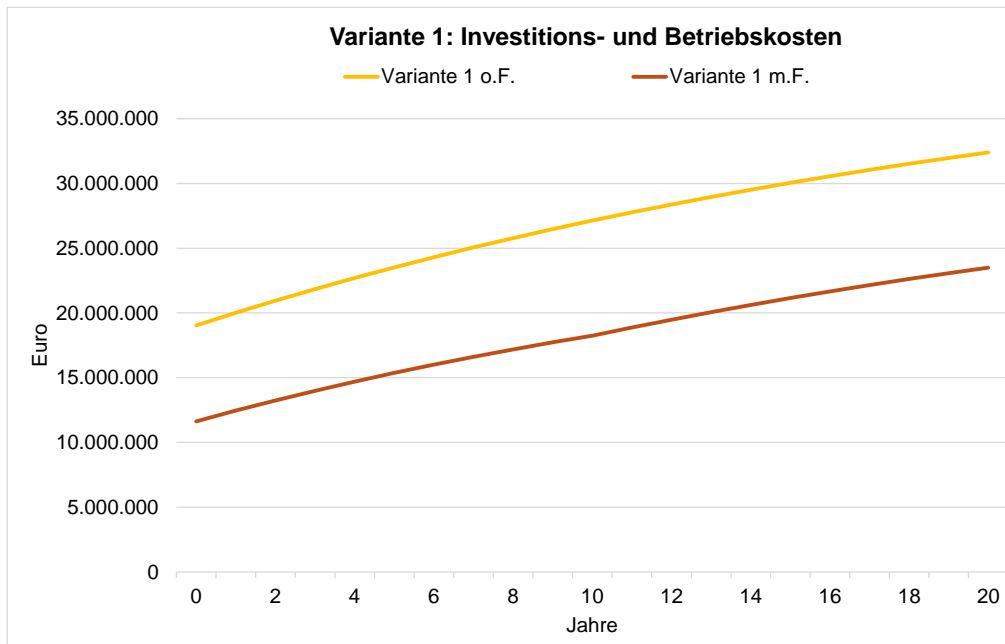


Abbildung 130: Bahnhofsvorstadt: Variante 1 (Vorzugsvariante) Investitions- und Betriebskosten, in netto

9.11 Fazit Beispielquartier Bahnhofsvorstadt

Im Rahmen der Studie wurde die Bahnhofsvorstadt in Plauen auf die Versorgung mittels geothermischer Wärme untersucht. Das Quartier hat eine Energiebezugsfläche von ca. 96.000 m² und wird aktuell überwiegend mit Fernwärme versorgt. Verbrauchswerte lagen für ca. 70 % der Liegenschaft vor. Mithilfe des THERMOS Tools wurden für die restlichen Gebäude der Wärmebedarf abgeschätzt. Der Heizwärmebedarf beläuft sich auf ca. 6.540 MWh (ca. 68 kWh/(m²a)).

Es wurde herausgearbeitet, dass ein Sanierungsbedarf für ca. 23 % der Energiebezugsfläche der Liegenschaft besteht, um flächendeckend die Nutzung von geothermisch erzeugter Niedertemperaturwärme (Heizungs-VL-Temperatur < 55 °C) zu ermöglichen (beispielhafte Sanierungsmaßnahmen: Ertüchtigung der Gebäudehülle, Vergrößerung von Heizflächen, etc.)). Basis dieses Ergebnisses ist die Abschätzung, dass Gebäude, die einen Heizwärmebedarf von mehr als 80 kWh/(m²a) aufweisen oder mit Einrohr-Heizungen betrieben werden, nicht niedertemperaturtauglich sind. Im Folgenden wurde die Umsetzung der Sanierungsmaßnahmen zur Realisierung der Niedertemperaturtauglichkeit im gesamten Quartier als Bedingung definiert und ist Grundlage der weiteren Berechnungen. In Folge dessen wurde eine perspektivische Reduktion des Heizwärmebedarfes und der Heizlast um 15 % für Gebäude angenommen, die saniert werden.

In einer HeatMap wurden die Wärmebedarfe und Wärmepotenziale für Geothermie verortet. Zusätzlich wurden Punkte verzeichnet, die geeignet zur Luftwärmegewinnung geeignet sind. Das Quartier wurde in die Teilbereiche Ost, West und Süd untergliedert. Es stellte sich heraus, dass Wärmepotenziale und Wärmebedarfe ungleichgewichtig verortet sind. Des Weiteren kann an Bereichen sehr hohen Bedarfs

nicht sichergestellt werden, ob die umliegenden Freiflächen zur Gewinnung der erforderlichen Umweltwärme gemäß gesetzlicher Vorgaben ausreichen.

Für die Bahnhofsvorstadt wurden drei Varianten zur konzeptionellen Quartierswärmeversorgung mittels Geothermie aufgestellt. Die Varianten unterscheiden sich in der Strategie zur Wärmeverteilung (NT-Netz, dezentrale Lösung, Kalt-Netz) und im angestrebten EE-Anteil. Als Vorzugsvariante wurde die Variante 1 gewählt. Herzstück dieser Variante sind zwei Energiezentralen im Quartier, die mittels 1,2 MW WP aus geothermischer Wärme Heizungswärme herstellen und über ein NT-Netz mit den Liegenschaften verbunden sind. Die WWB erfolgt durch dezentrale WP bzw. mittels elektrischer Nacherhitzung. Das EWS-Feld besteht aus 297 Sonden mit 300 m Tiefe, welche im Sommerhalbjahr zu 50 % mittels Wärme aus der Luft regeneriert werden.

Zur Spitzenlastdeckung wird Fernwärme in das NT-Netz gespeist. Gemäß Angaben der enviaTherm (FW-Betreiber) kann von einem EE-Anteil von 30 % ab dem Jahr 2030 ausgegangen werden.

Die stundenbasierte Jahreslastgangsimulation errechnet für das NT-Netz einen EE-Anteil von 75 %. Der Fernwärmeanteil zur Spitzenlastdeckung liegt bei 35% anteilig der eingespeisten Jahreswärmemenge. Circa 50 % beträgt der Wärmeanteil aus den EWS.

Eine Querschnitt-Prüfung des FW-Bestandsnetz hat gezeigt, dass entlang einiger Straßenzüge das Bestands-FW-Netz als NT-Netz weiterbetrieben werden könnte. Da der tatsächliche Zustand des Rohrsystems jedoch unbekannt ist, wurde bei der Investitionskostenschätzung von einer kompletten Neuinstallation eines NT-Netzes ausgegangen.

Die erforderlichen Gesamtinvestitionskosten betragen ca. 19 Mio. €. Der Anteil für Geothermieanlagen beträgt ca. 10,2 Mio. €. Unter Berücksichtigung der BEW-Förderung können die Gesamtinvestitionskosten auf ca. 11,6 Mio. € reduziert werden. Über einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren belaufen sich die Wärmegestehungskosten auf ca. 21,3 Ct/kWh. Bei maximalen Investitionskostenzuschüssen sowie Ausschöpfung der Betriebskostenunterstützung der BEW-Förderung können die Wärmegestehungskosten gegebenenfalls auf einen Wert von 15,4 Ct/kWh gesenkt werden.

Die Berechnungen zeigen ein umfangreiches Konzept, das in mehreren Iterationsschritten entwickelt wurde. Ein weiterer Schritt zur Kostenoptimierung kann möglich werden, wenn bei hohen Außentemperaturen die Direktnutzung von Luft als Wärmequelle für Wärmepumpen genutzt wird.

10 Geothermische Machbarkeitsstudie am Beispielquartier Oberlosa

Als drittes Beispielquartier wird das Gewerbegebiet Oberlosa am Rand der Stadt Plauen, nahe der Autobahn A72 gewählt. Das Gebiet ist in drei Teile gegliedert: 1, 2a und 2b. Teilgebiet 2a ist bereits bebaut. Die Teilgebiete 1 und 2b sind noch nicht bebaut oder vermarktet und haben, im Unterschied zu den in beiden vorangegangenen untersuchten Quartieren, noch keinen fertiggestellten Bebauungsplan. Ziel ist es, für Oberlosa ebenfalls ein Wärmekonzept überwiegend basierend auf geothermischer Wärme zu erarbeiten.

10.1 Datengrundlage und Annahmen

Datengrundlage ist der Auszug aus der digitalen Stadtkarte vom 01.09.2023 in dem eine Ermittlung der Gesamtflächen der drei Teilgebiete 1, 2a und 2b enthalten ist. Datengrundlage für die vermarktbareren Flächen ist die Abstimmung mit der Stadt Plauen, siehe Tabelle 44.

Tabelle 44: Datengrundlage (Quelle: Stadt Plauen)

Teilgebiet	vermarktbarere Grundstücksfläche [ha]
Teil 1a	19,40
Teil 2a	28,36
Teil 2b	24,65

Bisher ist unbekannt, welche Art von Gewerbe sich im Gebiet ansiedeln wird. Da das Gebiet eine sehr gute Verkehrsanbindung zur Autobahn hat, wird davon ausgegangen, dass der Standort eine überwiegende Nutzung durch Produktion und Logistik erfahren wird. Zusammen mit der Stadt Plauen wurden die Nutzungsanteile an der vermarktbareren Grundfläche wie folgt angenommen: Produktion 60 %, Logistik 20 % und Büro 20 % (Tabelle 45). Des Weiteren wurde der Anteil bebauter Grundstücksfläche auf 30 % abgeschätzt. Die Geschossigkeit der Gebäude wurde aus dem Bebauungsplan Nr. 31 des Teilgebietes 1 für alle andern Teilgebiete übernommen. In Summe wird eine Bruttogeschossfläche von ca. 280.000 m² berechnet.

Eine Übersicht aller getroffenen Annahmen befindet sich in Anhang A 4.1.

Tabelle 45: Oberlosa: Annahmen zur Flächennutzung

Annahmen			1	2a	2b
0	Status		unbebaut	unbebaut	unbebaut
1	Gesamtfläche [m ²]		286.686	329.714	309.230
2	Anteil vermarktbarer Grundstücksfläche [m ²]		194.000	283.600	246.500
3	Anteil bebauter Fläche [m ²]	30%	58.200	85.080	73.950
4	Anteil Nutzung		[m ²]	[m ²]	[m ²]
	Produktion	60%	34.920	51.048	44.370
	Logistik	20%	11.640	17.016	14.790
	Büro	20%	11.640	17.016	14.790
5	Bruttogeschossfläche	Geschossigkeit	[m ²]	[m ²]	[m ²]
	Produktion	1,0	34.920	51.048	44.370
	Logistik	1,0	11.640	17.016	14.790
	Büro	2,5	29.100	42.540	36.975
	Summe		75.660	110.604	96.135

Die Annahmen zum Heiz- & Kühlbedarf sind in Tabelle 46 abgebildet. Eine generelle Heizlast und ein Heizwärmebedarf für die einzelnen Gewerbesektoren abzuschätzen unterliegt ohne genauere Kenntnis der Gewerbeeinheiten einer großen Unschärfe. Starke Einflussfaktoren sind u.a. die Sollinnentemperatur, die Beschaffenheit der thermischen Hülle des Gebäudes, das Verhältnis aus thermischer Hülle zu Volumen des Gebäudes, der Fensterflächenanteil, interne Kälte- und Wärmequellen und die Art der Lüftung. Die folgende Abschätzung kann demnach nur als sehr grobes Szenario dienen.

Grundlage zur Abschätzung für den Sektor Produktion ist die Annahme von 8 m hohen Hallen in denen Menschen arbeiten, bei einer Sollinnentemperatur von ca. 18 °C. Im Sektor Logistik wird die Annahme getroffen, dass die Sollinnentemperatur niedriger ist (ca. 16 °C) jedoch erhöhte Lüftungswärmeverluste durch häufig geöffnete Hallentore entstehen (Hallenhöhe 10 m). In der weiterführenden Betrachtung wurden die spezifischen Heizwärmebedarfe/ Heizlasten auf Basis von Erfahrungswerten aus Referenzprojekten abgeschätzt.

Der Kühlbedarf ist sehr stark abhängig von den internen Wärmequellen (Maschinen, Rechner, Menschen) und solaren Einträgen. Die solaren Einträge von Gebäuden variieren stark in Abhängigkeit des Fensterflächenanteils und der Art der Verschattung. Insbesondere bei Bürogebäuden mit hohem Fensterflächenanteil hat des Weiteren die Ausrichtung der Hauptfensterfront hohen Einfluss auf die solaren Einträge und den Kühlbedarf. In modernen hochgedämmten Gebäuden kann unter Umständen die Kühllast die Heizlast übersteigen. Die spezifische Kühlleistung von Kühldecken ist in der Regel physikalisch, aufgrund des Ausfalls von Kondensat begrenzt. Üblicherweise können maximal 60 W/m² mittels Kühldecken gekühlt werden. Des Weiteren führt eine höhere Kühlung beispielsweise in Büroräumen oft zu Lasten der Behaglichkeit. Zur Abschätzung der Gesamtkühllast wurde ein Flächenanteil bemessen, der berücksichtigt, dass nicht alle Räume der Gebäude gekühlt werden.

Unter der Maßgabe der getroffenen Annahmen beträgt der gesamte Heizwärmebedarf der Teilgebiete von ca. 17.800 MWh und der Kühlbedarf von ca. 5.600 MWh. Annahmen sowie Zwischenschritte der Berechnung sind in Anhang A 4.1 und A 4.2 dokumentiert.

Tabelle 46: Oberlosa: Annahmen Heiz- und Kühlbedarf

Annahmen			1	2a	2b	Quelle	
6	Heizung	Heizlast	spezif. Heizlast [W/m ²]	[kW]	[kW]	[kW]	Annahme
		Produktion	45	1.571	2.297	1.997	
		Logistik	45	524	766	666	
		Büro	35	1.019	1.489	1.294	
7	Heizung	Heizwärmebedarf	spezif. Heizw.-Bedarf [kWh/(m ² a)]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	Annahme
		Produktion	70	2.444	3.573	3.106	
		Logistik	50	582	851	740	
		Büro	60	1.746	2.552	2.219	
8	Kühlung	Kühllast	spezif. Kühllast [W/m ²]	[kW]	[kW]	[kW]	Annahme
		Produktion	24	84	122	106	
		Logistik	60	122	179	155	
		Büro	60	1.222	1.787	1.553	
9	Kühlung	Kühlbedarf	anteilig Heizw.-Bedarf [%]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	Annahme
		Produktion	30%	733	1.072	932	
		Logistik	10%	58	85	74	
		Büro	40%	698	1.021	887	
10	Zusammenfassung						Berechnung
	Heizlast [kW]			3.114	4.552	3.956	
	Heizwärmebedarf [MWh]			4.772	6.977	6.064	
	Kühllast [kW]			1.428	2.088	1.815	
	Kühlbedarf [MWh]			1.490	2.178	1.893	

10.2 Potenzialanalyse Wärmequellen

10.2.1 Potenzialanalyse Geothermie

Das Beispielgebiet Oberlosa bietet im Gegensatz zu den oben beschriebenen städtischen Gebieten andere räumliche Bedingungen und Anforderungen. So weisen die Gebiete Oberlosa 1 und Oberlosa 2b große Freiflächen auf obwohl der Wärmebedarf nicht bekannt ist. Ein ausschlaggebender Faktor zur Potenzialanalyse ist dabei die Charakteristik der Flächen als Industriegebiete und damit die Abschätzung möglicher Anforderungen.

Der Einsatz von Erdwärmekollektoren oder Erdwärmekörpern ist aus technischer Hinsicht nicht auszuschließen, jedoch würde ihr Einsatz von den Besonderheiten des jeweiligen Projektes abhängen. Ob-

wohl in den Gebieten Oberlosa 1 und Oberlosa 2b eine hohe Platzverfügbarkeit besteht, können Erdwärmekollektoren und Erdwärmekörbe aufgrund der relativ geringen Vollastfähigkeit im Vergleich z.B. zu einem Erdwärmesondenfeld nicht empfohlen werden.

Die oberflächennahen sowie die tiefen Erdwärmesonden bieten durch ihren geringen Flächenbedarf und hohe Energieverfügbarkeit eine gute Möglichkeit für die Versorgung der Industrieeinheiten. Auch aus geologischer Sicht sind diese Optionen am Standort umsetzbar.

Bei Neubau-Projekten ist es durchaus sinnvoll, das Potenzial von thermisch aktivierten Bauelementen oder Energiepfählen zu berücksichtigen, wenn diese ohnehin für die Gründung des Gebäudes benötigt werden.

Die Beurteilung der hydrogeologischen Situation zeigt, dass die Nutzung von Grundwasserwärme für ein Projekt, das größer ist als ein Einfamilienhaus, nicht zu erwarten ist.

Tabelle 47: Zusammenfassende Tabelle der Möglichkeiten zur Erdwärmennutzung für einzelne Beispielgebiete

	Oberlosa		
	1	2a	2b
Geschlossene Systeme			
Erdwärmekollektoren	nicht zu empfehlen	nicht zu empfehlen	nicht zu empfehlen
Erdwärmesondenfelder	machbar	machbar	machbar
Erdwärmekörbe	nicht zu empfehlen	nicht zu empfehlen	nicht zu empfehlen
thermisch aktive Bauteilsysteme	machbar	nicht machbar	machbar
Offene Systeme			
Grundwasserwärmepumpen	nicht machbar	nicht machbar	nicht machbar
Grubenwasser	nicht machbar	nicht machbar	nicht machbar
Tiefe Geothermie			
Tiefe EWS	machbar	machbar	machbar

10.2.2 Positionierung der Sonden am Standort

Die Analyse der Freiflächen in den Oberlosa-Beispielgebieten wurde unter Berücksichtigung des unterschiedlichen Bebauungsgrades, der Flurstücke und der Anforderungen der einzelnen Gebiete durchgeführt. Es wurden Bäume bzw. Vegetation sowie geplante und gebaute Gebäude und Straßen als unbenutzbare Flächen definiert und farblich gekennzeichnet (siehe Abbildung 131). Mithilfe der Freiflächenanalyse konnten die möglichen Sondenpositionen am Standort bestimmt werden, welche auf den unmarkierten Flächen verortet werden können. Die Möglichkeit Sonden unterhalb von Parkplatzflä-

chen oder betonierten Flächen nachträglich niederzubringen und im Anschluss an die Bauarbeiten wieder ihrem ursprünglichen Nutzen zugänglich zu machen würde bestehen, aber wurde in den vorliegenden Szenarios nicht betrachtet. Auf den Freiflächen wurde die maximal positionierbare Sondenanzahl der Beispielgebiete ermittelt. Dabei wurden Sonden im Abstand von 9 m in einem regelmäßigen Raster ausgelegt. Die Anzahl der Sonden in den einzelnen Gebieten können der folgenden Tabelle 48 entnommen werden.

Tabelle 48: Anzahl der maximalen Erdwärmesonden in den Beispielgebieten Oberlosa 1, 2a und 2b mit 9 m Sondenabstand.

Beispielgebiet	Anzahl von EWS
Oberlosa 1	3.362
Oberlosa 2a	2.746
Oberlosa 2b	5.185

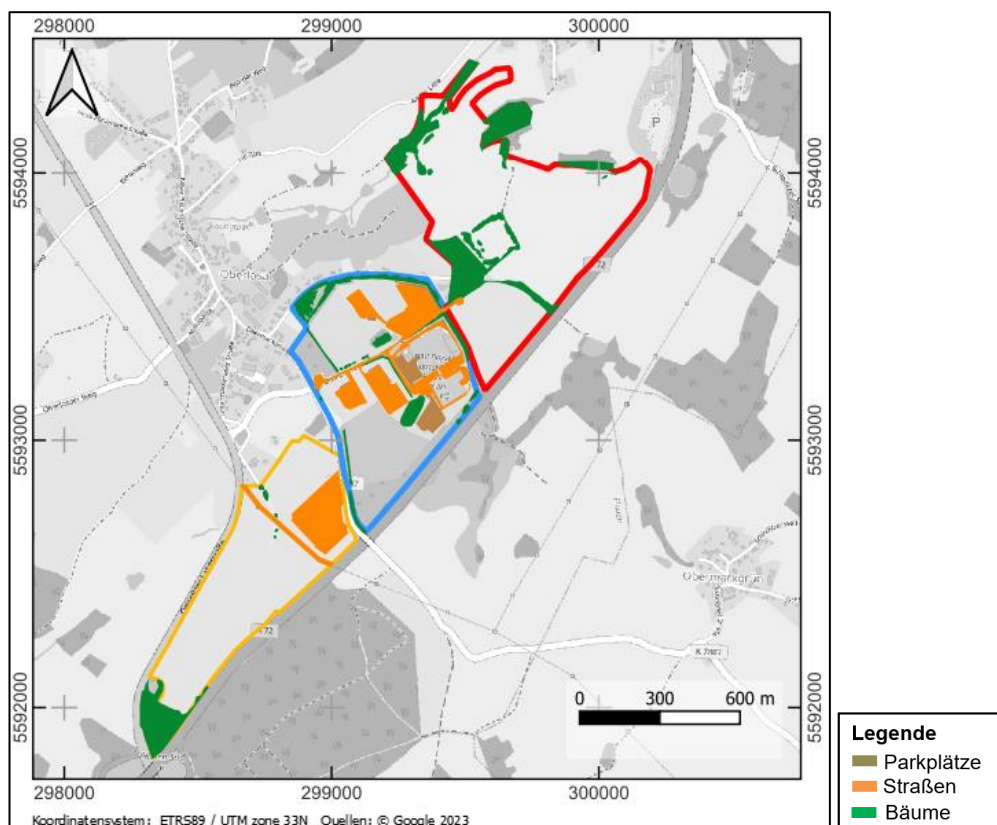


Abbildung 131: Betrachtung der unbenutzbaren Fläche der Beispielgebiete Oberlosa.

10.2.3 Potenzialermittlung Luftwärmenutzung

Wie bereits im Kapitel 9.2.3 beschrieben wurde, kann mit einem geringen technischen Aufwand das Energiepotenzial der Luft, sogar auch in der Nacht, genutzt werden. Dies geschieht über Rückkühler,

welche üblicherweise zur Kühlung von Industriehallen und Lebensmittelmärkten auf den Dächern installiert werden, aber auch umgekehrt zur Wärmegewinnung dienen können. Die Kenndaten eines Beispielgerätes sind in Tabelle 25 dokumentiert.

Die Schallemission der Rückkühler wird überwiegend als vernachlässigbar abgeschätzt, da in den Kapiteln 1, 2a und 2b keine Wohnbebauung vorzufinden ist. Zudem beträgt der berechnete Schalldruckpegel des Beispielgerätes (siehe Tabelle 25) in 10 m Entfernung 35 dB(A), wodurch ein Einzelgerät die Vorgaben gemäß TA Lärm für "reine Wohngebiete" und Krankenhäuser zum Zeitpunkt Nacht einhält. Zur Abschätzung der Gesamtemissionen mehrerer Geräte, ist eine genaue Berechnung unter Prüfung der örtlichen Gegebenheiten durch ein Schallschutzgutachten vorzunehmen.

Um eine Orientierung zur Abschätzung des Potenzials der Luftwärmenutzung zu gewinnen, wurde beispielhaft entlang der Autobahn A72 eine Reihe Rückkühler, unter Berücksichtigung von 10 m Abstand zwischen den Geräten positioniert. Insgesamt werden nach dieser Methode Potenzialflächen für 161 Geräte ermittelt. Unter den genannten Annahmen steht ein Gesamtpotenzial von ca. 60 MW Leistung den Teilgebieten 1, 2a und 2b durch Rückkühler zur Verfügung. Unter Annahme von jährlich 2.000 Vollbenutzungsstunden berechnet sich ein potenzieller Wärmeertrag von 120 GWh/a. Dieser Wert übersteigt mehr als das Doppelte des jährlichen Heizwärmebedarfs des gesamten Quartiers. Das Rechenbeispiel zeigt, dass im Kontext des Quartierswärmebedarfes ein nahezu unausschöpfliches Potenzial der Luftwärmenutzung in der Jahresbilanz besteht (allein bei Positionierung von Rückkühlern in einer Reihe entlang der Autobahn). Jedoch ist zu berücksichtigen, dass die Nutzbarkeit der Rückkühler nur dann gegeben ist, wenn die Außentemperatur eine entsprechende Höhe hat. Unter einer Außentemperatur von 5°C geht die Nutzung deutlich zu Lasten der Effizienz der Wärmepumpe.

10.2.4 Potenzialermittlung PV-Stromerzeugung

Zur Ermittlung des Potenzials der PV-Stromerzeugung wurde die exemplarische Annahme getroffen, dass 10 % der betrachteten Gebietsfläche zur Freiflächen-PV-Stromerzeugung genutzt werden kann. Daraus berechnet sich eine potenzielle Installationsfläche von etwa 28.700 m² Grundstück in Teilfläche 1, 32.970 m² in Teilfläche 2a und 30.920 m² in Teilfläche 2b. Es werden alternativ sowohl nach Süden als auch nach Ost/West ausgerichtete PV-Anlagen betrachtet. In beiden Varianten wird das PV-Modul Heckert Solar Apollon 1.0 108 M 435W der Firma Heckert Solar als Berechnungsgrundlage verwendet.

Bei der nach Süden ausgerichteten Freiflächenanlage beträgt die Installationsfläche eines Modultisches ca. 24,2 m². Ein Modultisch wird bestehend aus 12 Modulen und mit einem Reihenabstand von 6,5 m angenommen. Die von den PV-Modulen beanspruchte Fläche würde in Teilfläche 1 ca. 9.900 m², in Teilfläche 2a ca. 11.400 m² und in Teilfläche 2b ca. 10.700 m² betragen. Dies entspricht einer Modulanzahl von etwa 5.000 Modulen mit einer Leistung von 2.180 kWp in Teilfläche 1, rund 5.770 Modulen

und 2.500 kWp in Teilfläche 2a sowie etwa 5.420 Modulen und 2.350 kWp in Teilfläche 2b. Insgesamt würden die nach Süden ausgerichteten Freiflächenanlagen ca. 32.000 m² beanspruchen und eine Leistung von rund 7.000 kWp erzeugen. Für die nach Ost/West ausgerichteten Freiflächenanlagen beträgt die Installationsfläche eines Modultisches ca. 99,3 m². Jeder Modultisch umfasst 48 Module mit einem Reihenabstand von 2,5 m. In Teilfläche 1 würde die von den PV-Modulen genutzte Fläche ca. 22.650 m² betragen, mit etwa 11.460 Modulen und einer installierbaren Leistung von 4.980 kWp. In Teilfläche 2a wären es ca. 26.000 m² mit 13.180 Modulen und einer Leistung von 5.730 kWp, während Teilfläche 2b eine Fläche von ca. 24.430 m² mit 12.360 Modulen und einer installierbaren Leistung von 5.380 kWp umfassen würde. Insgesamt würden die nach Ost/West ausgerichteten Freiflächenanlagen ca. 37.000 m² beanspruchen und eine potenzielle Leistung von etwa 16.000 kWp bereitstellen. Unter Annahme eines Jahresertrags von 1000 kWh je kWp Leistung der nach Süden ausgerichteten Flächen werden für die Teilgebiete folgende Jahreserträge abgeschätzt: Teilgebiet 1: 2.500 MWh; Teilgebiet 2a: 5.420 MWh; Teilgebiet 2b: 2.350 MWh.

10.3 Erstellung einer HeatMap

Eine HeatMap dient in der Regel zur kartographischen Darstellung der Verteilung von Bedarfen und Potenzialen im Quartier. Da jedoch im Quartier sehr wenig räumliche Vorgaben bestehen, wurden nur die Bedarfe für Heizwärme und Kühlung als Punkt je Teilgebiet eingetragen, sowie die Freiflächen zur Verortung von EWS-Feldern in der HeatMap gekennzeichnet (Anhang 0). Die Verortung von Rückkühlern nimmt gegenüber der EWS-Felder nur sehr geringe Flächen in Anspruch und kann auf den EWS-Feldern selbst vorgenommen werden. Anstelle der kartographischen Verortung wird im Folgenden eine tabellarische Zusammenfassung der Potenzialanalyse (Tabelle 49), Tabelle 1 gemäß der getroffenen Annahmen aus Kapitel 10.2, dargestellt.

Tabelle 49: Oberlosa Zusammenfassung der Potenzialanalyse

Teilgebiet	1	2a	2b	Gesamt
Luftwärme [MWh/a]	> 49.000	> 29.000	> 42.000	> 120.000
PV-Strom [MWh/a]	2.500	5.420	2.350	10.270
Pot. EWS-Punkte	3.362	2.746	5.185	1.1293

Des Weiteren sind die Summen des Kühlbedarfes und des Heizwärmebedarfes je Teilgebiet in Tabelle 50 zusammengefasst. In Summe beträgt der Heizwärmebedarf 17.900 MWh, was bezogen auf die vermarktbarere Grundstücksfläche einem Wert von 24,7 kWh/(m²·a) entspricht.

Tabelle 50: Oberlosa Heiz-Kühlbedarf

Teilgebiet	1	2a	2b	Gesamt
Heizwärmebedarf [MWh/a]	4.800	7.000	6.100	17.900
Kühlbedarf [MWh/a]	1.500	2.200	1.900	5.600

10.4 Quartiersanalyse

Aufgrund der nicht abgeschlossenen Bebauungspläne im Quartier und überwiegend unbebauten Grundstücken, konnte nur sehr unscharf und unter Zuhilfenahme von Annahmen sowohl der Betrag (siehe Kapitel 10.1) als auch die Verortung (siehe Anhang 0) von Bedarfen, sowie Potenzialen vorgenommen werden.

Zur geothermischen Wärmeversorgung wird daher kein Wärmenetz empfohlen, dass aufbereitete Heizungswärme im Quartier verteilt. Dezentrale Systeme oder Kalt-Netze bieten eine höhere Flexibilität zur Deckung des Wärme- und Kältebedarfes und werden im Folgenden näher erläutert.

10.5 Variantenerstellung

Nach dem die Quartiersanalyse abgeschlossen ist, folgt die Variantenerstellung im Rahmen der Konzeption. In der Abbildung 132 werden die drei Varianten von Oberlosa dargestellt. Die Varianten unterscheiden sich in der Art der Wärmeverteilung, der WP-Strategie, dem erneuerbaren Deckungsanteil und der Art der Spitzenlastdeckung.

Alle Varianten beinhalten die Bereitstellung von Heizungswärme bis ca. 55°C und keine Warmwasserbereitung. In einem Quartier, das überwiegend gewerblich genutzt wird, ist der Warmwasserbedarf in der Regel sehr gering, wodurch eine rein dezentral elektrische Warmwasserbereitung für das Quartier Oberlosa angenommen wird. Des Weiteren ist in den Varianten nicht die Herstellung von Prozesswärme berücksichtigt, da die Anforderungen zum einen sehr nutzerabhängig sind und zum anderen der Einsatz von oberflächennaher Geothermie zur Herstellung von Prozesswärme in der Regel nur unter hohem Stromeinsatz möglich ist.

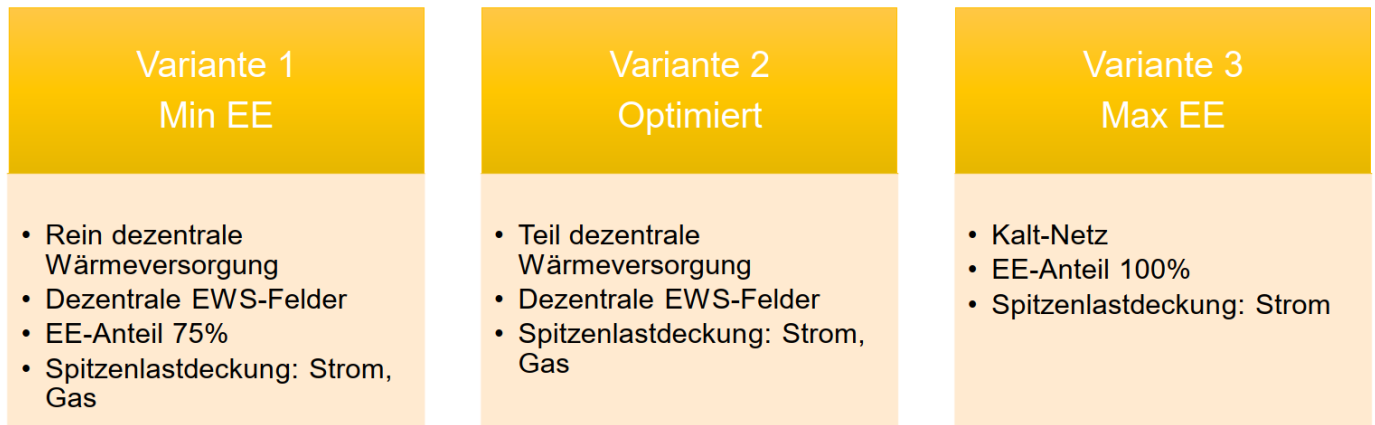


Abbildung 132: Oberlosa: Variantenüberblick

10.5.1 Variante 1

Das Funktionsschema der Variante 1 ist in Abbildung 133 dargestellt. Die Variante 1 ist charakterisiert durch eine rein dezentrale Wärmeerzeugung. An getrennten Verbraucherstandorten existieren Energiezentralen, welche zur Grundlastdeckung WP nutzen, und zur Spitzenlastdeckung einen Gaskessel. Die WP bezieht Wärme aus dezentralen EWS-Feldern, je Grundstück und wird rein zur Herstellung von Heizungswärme eingesetzt.

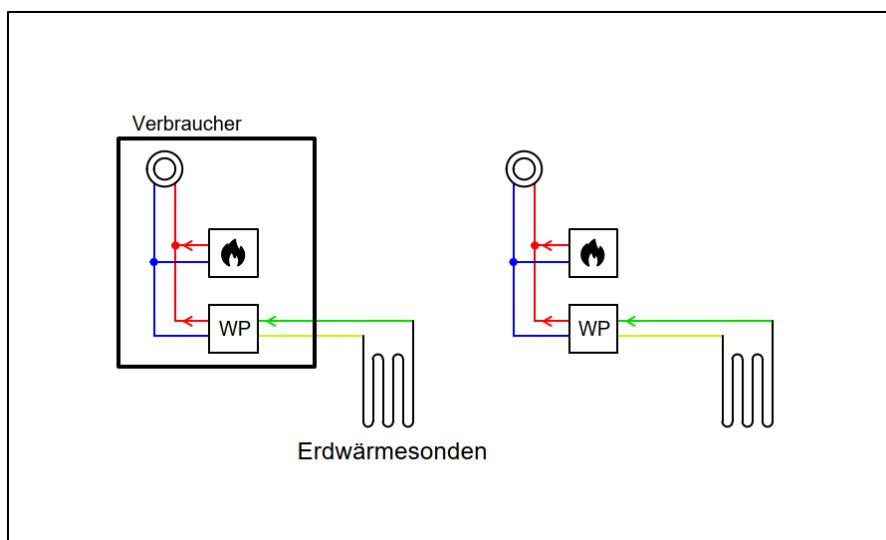


Abbildung 133: Oberlosa, Variante 1: Funktionsschema

Vorteil des Energiekonzeptes ist eine hohe Planbarkeit, da nutzerspezifisch Erzeugerstandorte aufgebaut werden können. Nachteilig ist der erhöhte Aufwand für Planung, Beantragung und Realisierung von getrennten EWS-Feldern und das getrennte Energiemanagement der Verbraucher, wodurch die Möglichkeit zur Nutzung von Abwärme nicht berücksichtigt ist.

10.5.2 Variante 2

Das Funktionsschema der Variante 2 ist in Abbildung 134 dargestellt. Die Variante 2 ähnelt sehr der Variante 1, da sie im Wesentlichen aus dezentralen Energiesystemen je Verbraucher besteht. Im Unterschied zur Variante 1 beinhaltet Variante 2 die gemeinsame Nutzung von EWS-Feldern durch einzelne benachbarte Verbraucher. Es besteht jedoch kein quartiersübergreifendes Energiemanagement der EWS-Felder, und keine Regeneration der EWS-Felder.

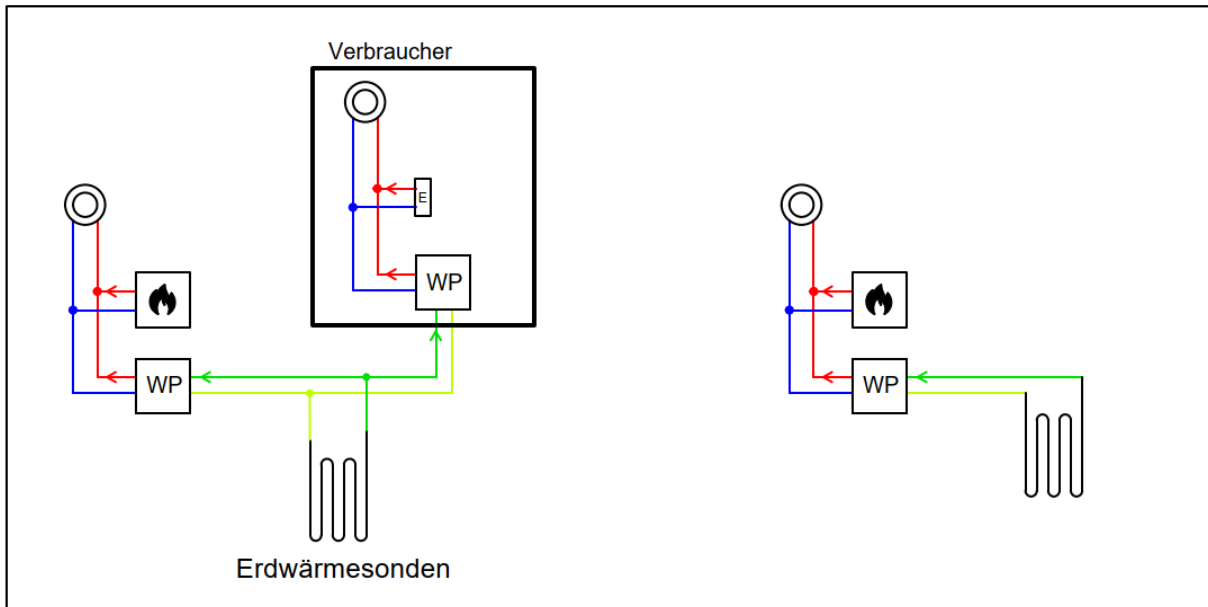


Abbildung 134: Oberlosa, Variante 2: Funktionsschema

Vorteil des Energiekonzeptes ist eine hohe Planbarkeit, und zusätzlich die Nutzung von Symbioseeffekten des nachbarschaftlichen Wärmemanagements.

Nachteilig ist, dass kein flächendeckend geplantes Energiemanagement zur Nutzung von Wärmepotenzialen besteht. Die nachträgliche Erweiterbarkeit des Konzeptes ist in der Regel erschwert durch die Kreuzung des Öffentlichen Raumes.

10.5.3 Variante 3

Das Funktionsschema der Variante 3 ist in Abbildung 135 dargestellt. Wie in den Varianten 1 und 2 erzeugen dezentrale Wärmepumpen die Raumwärme der Verbraucher. Jedoch besteht ein übergeordnetes Energiemanagement der Wärmequellen, welches mittels eines "Kalt-Netzes" (siehe Kapitel 5.2) Umweltenergie zur Versorgung der WP und zur Kühlung der Gebäude transportiert. Das Kalt-Netz ist in Abbildung 135 mit dunkelgrüner Linie (VL) und hellgrüner Linie (RL) dargestellt und besteht aus unisolierten PE-Rohren. Das Kalt-Netz verbindet EWS-Felder mit Regenerationswärmequellen, wie Rückkühler und Verbraucher. Aufgrund der geringen Systemtemperatur (ca. 0-15°C) können durch die zurückgelegten Wegstrecken durch die erdverlegten Leitungen Wärmegewinne entstehen, bzw. das Erdreich als

Saisonalspeicher genutzt werden. Die niedrige Systemtemperatur hat des Weiteren den Vorteil, dass Abwärme im Niedertemperaturbereich, die nur geringfügig höhere Temperaturen als das Kalt-Netz aufweist als Wärmeeintrag genutzt werden kann. Die Einbindung verschiedener, im Quartier verteilter, Wärmequellen zur Regeneration der EWS-Felder ist ebenfalls möglich. Zudem steht bei Wartung oder Revision einzelner Wärmequellen die Nutzung anderer Wärmequellen zur Verfügung. Eine ungleichgewichtige Verteilung von Umweltwärmepotenzialen und Wärmebedarfen in einem Quartier kann weiterhin ausgeglichen werden.

Nachteilig ist die Aufwendung höherer Investitionssummen zur zusammenhängenden Erschließung eines Quartiers zu einem Zeitpunkt gegenüber eines sukzessiven Ausbaus von Kleinanlagen über einen längeren Zeitraum. Des Weiteren wird eine zusammenhängende Planung benötigt, die Vermarktung durch einen WärmeverSORger ist erforderlich und mehrere Verbraucher, die über eine gemeinsame Zeitspanne hinweg ihre Wärme- und Kälteversorgung installieren bzw. transformieren wollen, müssen akquiriert werden.

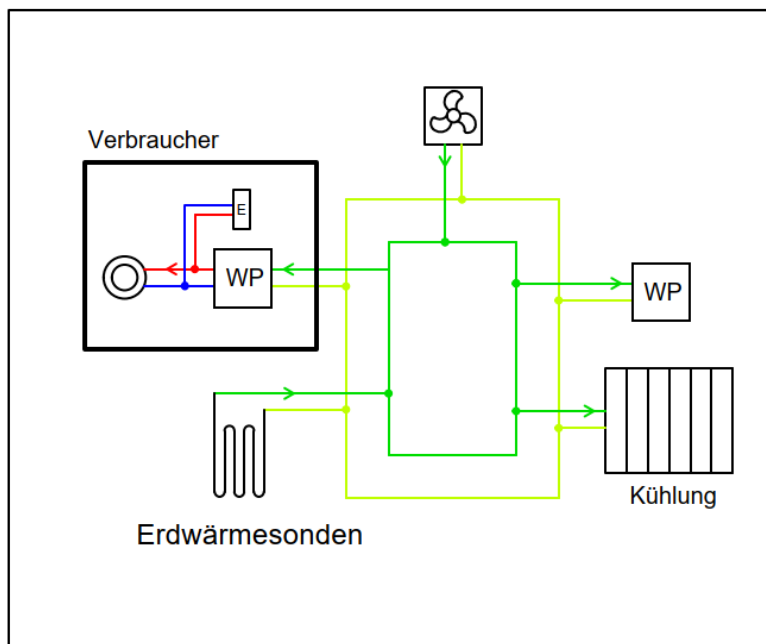


Abbildung 135: Oberlosa, Variante 3: Funktionsschema

10.5.4 Festlegung einer Vorzugsvariante

Als Vorzugsvariante für das Beispielquartier Oberlosa wird die Variante 3 gewählt. Grund dafür ist die bestmögliche grundstückübergreifende Nutzung von geothermischen Wärmequellen, deren vielseitige Regenerationsmöglichkeiten und die potenzielle Einbindung von Abwärmequellen. Es kann auf Basis des Kalt-Netzes mittels WP das individuell erforderliche Temperaturniveau am Verbraucher bereitge-

stellt werden. Des Weiteren kann eine mögliche Ungleichverteilung von Wärmepotenzialen und Wärmebedarfen im Quartier ausgeglichen werden, was vorteilhaft zur Erhöhung des geothermischen Deckungsanteils beiträgt.

Das unscharfe Bedarfsszenario im Beispielquartier erschwert grundlegend die Entwicklung eines Quartierswärmekonzeptes. Die Flexibilität eines entsprechend groß dimensionierten Kalt-Netzes bietet die Möglichkeit, hohe Wärme- und Kälteleistungen dem Verbraucher in Zukunft bereit zu stellen, ohne bei geringem Lastfall hohe Wärmeeinbußen durch Transmissionswärmeverluste in Kauf nehmen zu müssen. Aus diesen Gründen wird die Variante 3 als Vorzugsvariante gewählt und im Folgenden geothermisch sowie technisch dimensioniert.

10.6 Geothermische Dimensionierung

10.6.1 Geothermische Randbedingungen

Die geothermischen Eigenschaften des Untergrundes sind für jeden Standort spezifisch und können auch kleinräumig signifikant variieren. Die Gesteinseigenschaften werden durch verschiedene Parameter beeinflusst, wobei besonders Wassergehalt, Grundwasserfluss, Dichte und regionale Unterschiede als Einflussfaktoren zu nennen sind. Da im Rahmen des Forschungsprojektes kein Thermal Response Test (TRT) zur Bestimmung der Untergrundeigenschaften am Standort durchgeführt wurde, werden diese mithilfe vorhandener Daten für verschiedene Tiefen ermittelt. Die dafür verwendete Vorgehensweise wird im Folgenden dargestellt.

10.6.1.1 Wärmeleitfähigkeit

Für die Modellierung der Gesteinswärmeleitfähigkeit in den Oberlosa-Beispielgebieten wurde nach Rücksprache mit Vertretern des LfULG und Vergleich mit dem GeoPLASMA-CE-Modell ein Wert von $2,4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ für die Schuppenzone (Einheit 34) in den Beispielgebieten verwendet. Gemäß der geologischen Karte wurde der Test in einem Mikrocluster durchgeführt, der nur einen der in Einheit 34 (Schuppenzone) vertretenen Gesteinstypen repräsentiert. Bei der Beurteilung der Durchführbarkeit eines konkreten Projekts in den Oberlosa-Beispielgebieten wäre es daher notwendig, den Wärmeleitfähigkeitswert mit einem TRT neu zu messen.

Das Wärmeleitfähigkeitsmodell wird ebenfalls durch Tiefenschnitte der effektiven Wärmeleitfähigkeit dargestellt. Aus den Schnitten ist ersichtlich, dass die einfache geologische Situation der Oberlosa-Beispielgebiete 1 und 2a, wie sie das geologische 3D-Modell darstellt, direkt in das geothermische Modell einfließt. Einzige Ausnahme ist ein schmales Band in Tiefen unterhalb von ca. 150 m entlang der östlichen Grenze des Beispielgebietes Oberlosa 2a, wo sich bereits die Einheit 26 (Phyllite) erstreckt. Dies zeigt auch die Statistik der Verteilung der Wärmeleitfähigkeitswerte in den Oberlosa-Beispielgebieten

(Tabelle 51 und Tabelle 52, Abbildung 136 und Abbildung 137). Für die Zwecke der Machbarkeitsabschätzung bzw. Vorsorgeplanung in den Oberlosa-Beispielgebieten 1 und 2a kann somit das arithmetische Mittel der Werte der gewählten Tiefenstufe als repräsentativer Wert der Wärmeleitfähigkeit verwendet werden.

Tabelle 51: Mittelwerte, Minima und Maxima der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Tiefenstufen im Beispielsgebiet Oberlosa 1

Tiefe	50 m	100 m	150 m	200 m	250 m	300 m	350 m	400 m
	effektive Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]							
Mittelwert	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Min	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Max	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4

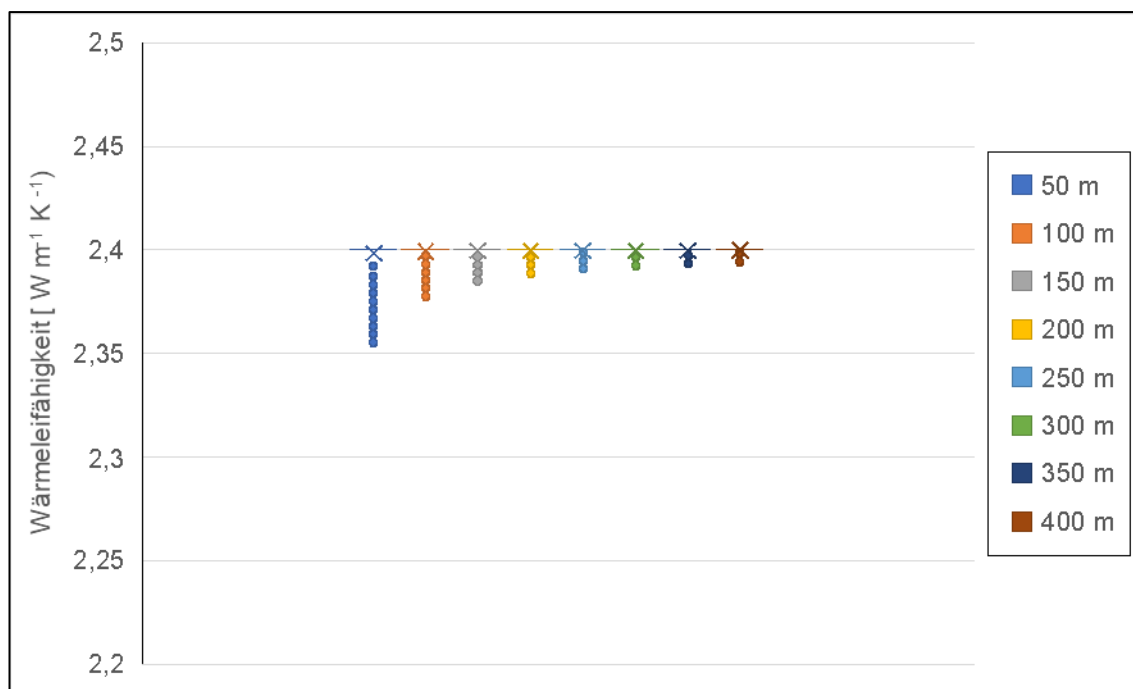


Abbildung 136: Verteilung der Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Tiefenstufen im Beispielsgebiet Oberlosa 1

Tabelle 52: Mittelwerte, Minima und Maxima der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Tiefenstufen im Beispielsgebiet Oberlosa 2a

Tiefe	50 m	100 m	150 m	200 m	250 m	300 m	350 m	400 m
	effektive Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]							
Mittelwert	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Min	2,3	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Max	2,4	2,4	2,4	2,6	2,6	2,7	2,7	2,7

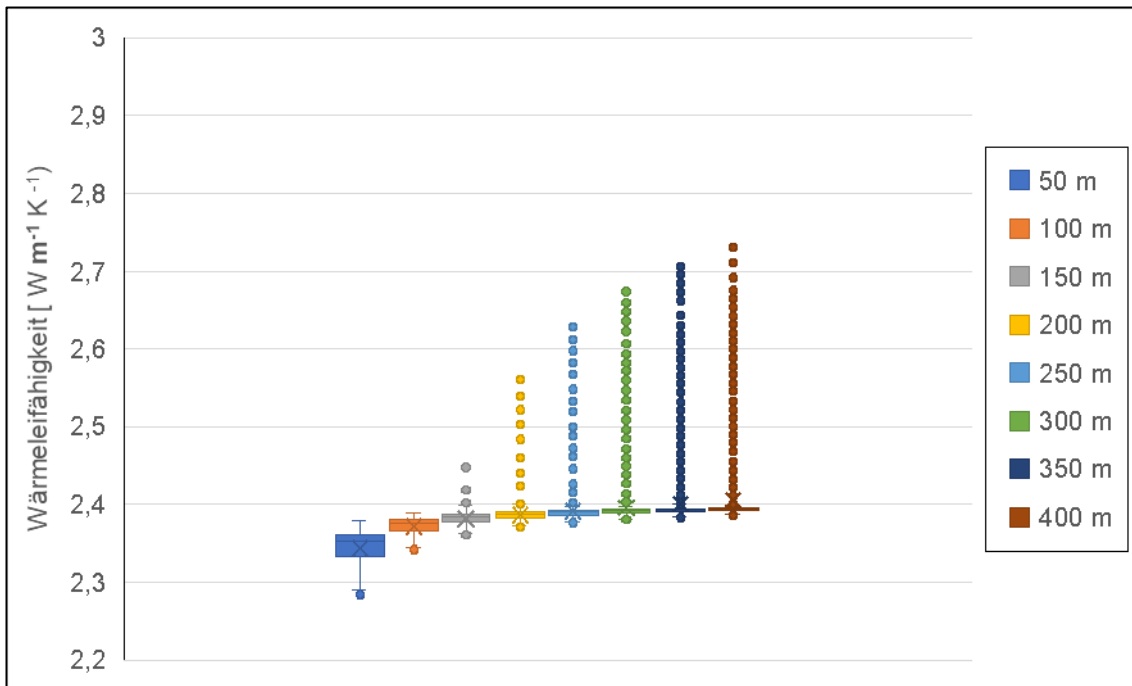


Abbildung 137: Verteilung der Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Tiefenstufen im Beispielsgebiet Oberlosa 2a

Die geologische Struktur des Beispielgebietes Oberlosa 2b ist vielfältiger, was sich auch im geothermischen Modell des Gebietes in den Tiefenschnitten der effektiven Wärmeleitfähigkeit und der statischen Rangverteilung (Tabelle 53, Abbildung 138) widerspiegelt. Für eine grundsätzliche Bestimmung des Potenzials des Beispielgebietes Oberlosa 2b oder eine generelle Einschätzung der Machbarkeit von Geothermieprojekten auf der Ebene des gesamten Beispielgebietes kann das arithmetische Mittel der Werte der gewählten Tiefenstufe verwendet werden. Für eine detailliertere Planung ist es nicht sinnvoll, den Durchschnitt eines bestimmten definierten Gebietes eines bestimmten Projektes zu verwenden, um die Machbarkeit bestimmter kleinerer Projekte zu beurteilen.

Tabelle 53: Mittelwerte, Minima und Maxima der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Tiefenstufen im Beispielsgebiet Oberlosa 2b

Tiefe	50 m	100 m	150 m	200 m	250 m	300 m	350 m	400 m
	effektive Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]							
Mittelwert	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,8
Min	2,1	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Max	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9

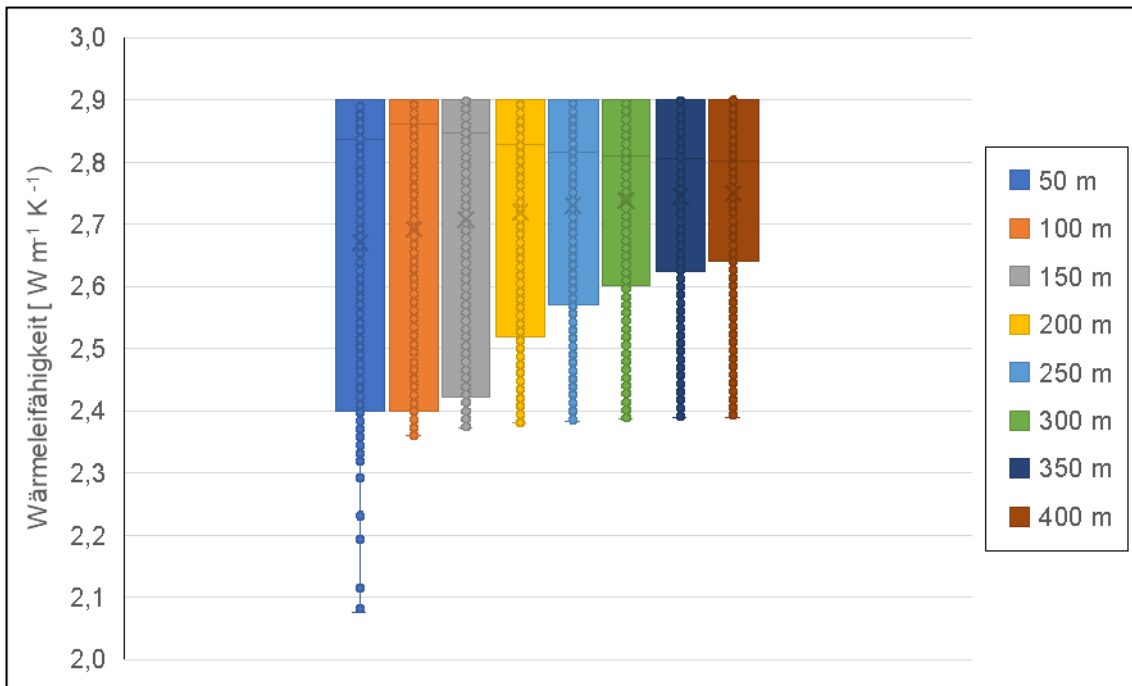


Abbildung 138: Verteilung der Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Tiefenstufen im Beispielsgebiet Oberlosa 2b

10.6.1.2 Untergrundtemperatur

Für die geothermische Dimensionierung wurde ein 1D-Modell der Temperaturentwicklung mit der Tiefe für die umliegenden Beispielgebiete (rund um die Stadt Plauen) erstellt (siehe Kapitel 4.2.3). Die Tabelle 54 zeigt die durchschnittlichen Temperaturen der Gesteinsumgebung für Tiefenstufen von 50 bis 400 m mit einer Schrittweite von 50 m.

Tabelle 54: Temperaturprofil der Beispielgebiete Oberlosa gemäß dem konstruierten linearen 1D-Modell

Tiefe	50 m	100 m	150 m	200 m	250 m	300 m	350 m	400 m
q_{geo} [mW/m ²]	45							
λ_{eff} [W/(m·K)]	2,4							
Mitteltemperatur [°C]	9,5	9,9	10,4	10,9	11,3	11,8	12,3	12,8

10.6.2 Simulationsrandbedingungen

Die Simulationen wurden mit der Software EED durchgeführt. Die zuvor ermittelten Untergrundparameter sowie die angenommenen haustechnischen Randbedingungen werden in den Berechnungen betrachtet. Für die Simulationen wurde eine laminare Durchströmung der Erdwärmesonden von 0,45 l/s angesetzt, um einen konservativen Ansatz bei der Dimensionierung zu verfolgen. Als Sondenfluid wird Wasser mit einem 25 %-igen Glykolanteil verwendet.

Für die Simulationsberechnungen sind neben dem Bohrungsdesign (wie Bohrlochdurchmesser und Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllmaterials) vor allem die Grenztemperaturen des Sondenfluids entscheidend. Für die Simulation oberflächennaher Geothermie wird als Durchschnitt zwischen Vor- und Rücklauf mit einer Differenz von 3 K berechnet. Bei tiefen Erdwärmesonden werden im Durchschnitt Vor- und Rücklauftemperaturen mit einer Spreizung von 5 K berechnet. Im Grundlastfall wird gemäß VDI 4640-2 eine minimale Sondenfluidtemperatur von 0 °C im Vorlauf angesetzt, was zu einer mittleren Grenztemperatur von 1,5 °C im Programm führt. Im Spitzenlastfall gilt die Vorgabe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), dass im 50. Betriebsjahr ein Absinken der mittleren Fluidtemperatur (Durchschnitt aus Vor- und Rücklauf) unter -1,5 °C verhindert werden muss.

Wenn die geplante Sondenanordnung keinem regelmäßigen Muster entspricht wird im Simulationsprogramm die Funktion „irregular configuration“ gewählt. Dabei werden die tatsächlichen Positionen der Bohrungen eingelesen und programmintern durch die Variation von Anordnung, Abstand und Sondenanzahl die beste Näherung an eine im Programm hinterlegte, regelmäßige Konfiguration errechnet. Die Optimierung des Sondenfeldes geschieht iterativ.

10.6.3 Dimensionierungsergebnisse

In der Simulation wurden die Abdeckung der ermittelten Bedarfswerte mittels oberflächennaher und tiefer Erdwärmesonden dargestellt. Die unterschiedlichen Ausgangscharakteristika der Beispielgebiete ermöglichen verschiedene Betrachtungen zur energetischen Versorgung. In den Gebieten Oberlosa 1 und Oberlosa 2a werden tiefe Erdwärmesonden simuliert, welche eine hohe Abdeckung des energetischen Bedarfs erreichen. Da die Untergrundtemperaturen bei großen Tiefen zunehmen, empfiehlt sich die Abdeckung eines hohen Wärmebedarfs durch Tiefe Erdwärmesonden.

Tabelle 55: Zusammenfassung der erdseitigen energetischen Kennwerte für die Beispielgebiete Oberlosa

	Oberlosa 1	Oberlosa 2a	Oberlosa 2b
Heizbedarf [MWh/a]	3776,8	5521,2	4798,9
Kühlbedarf [MWh/a]	1489,9	2178,1	1890,1
Regeneration [MWh/a]			2908,9

Die für die Gebiete ausgelegten Sondenfelder sollen beispielhaft unterschiedliche Ausgangsbedingungen simulieren und Lösungsoptionen darstellen. **Oberlosa 1** weist bisher nur einen geringen Bebauungsanteil durch Gebäude oder Straßen im südöstlichen Bereich und Vegetation im Westen auf. Für dieses Gebiet werden mehrere Einzelfelder simuliert, welche sich an Flurstückgrenzen orientieren. Die dargestellten Erdwärmesondenfelder sollen dabei beispielhaft für die Variante mit Einzelfeldern sein und wurden zur Vereinfachung auf 4 quadratische Felder ausgelegt. Der Gesamtheiz- und Kühlbedarf kann mit insgesamt 320 Sonden je 400 m im Beispielgebiet Oberlosa 1 abgedeckt werden. Die hohen

Temperaturen im Untergrund führen dazu, dass ein hoher Wärmebedarf abgedeckt werden kann, ohne den Untergrund zu schnell auszukühlen. Durch den geringen Kühlbedarf, welcher in Industriegebäuden bei beispielsweise Bürogebäuden bestehen könnte, kann der Untergrund zusätzlich regeneriert werden. Das große Flurstück im Westen des Gebietes beinhaltet zwei Erdwärmesondenfelder mit 119 und 64 Sonden unter der Annahme, dass bei intensiver Bebauung des Flurstücks unterschiedliche Flächen zur Verfügung stehen, wie beispielsweise unterhalb eines Gebäudes oder eine Parkplatzfläche. Auf zwei weiteren Flurstücken wurden weiterhin Sondenfelder mit 60 bzw. 77 Sonden platziert. Alle Einzelfelder weisen einen Sondenabstand von 9 m auf.

Entsprechend der Freiflächenanalyse wurden die Sonden in **Oberlosa 2a** im südlichen Bereich des Gebietes als Gesamtsondenfeld verortet. Im Gegensatz zu Oberlosa 1 wurde der Fokus auf ein möglichst kompaktes Sondenfeld gelegt, welches nicht an Flurstücksgrenzen ausgerichtet wurde. Diese Variante demonstriert ein bereits bebautes Gebiet mit nur einer zur Verfügung stehenden Freifläche, wie beispielsweise einer Feldfläche. Aus den energetischen Randbedingungen wurde anschließend die benötigte Sondenanzahl zur Abdeckung des Energiebedarfes ermittelt. Zur Abdeckung des Gesamtheiz- und Kühlbedarfs (vgl. Tabelle 55) im vorliegenden Teilgebiet wurden 768 Sonden mit je 400 m Tiefe positioniert.

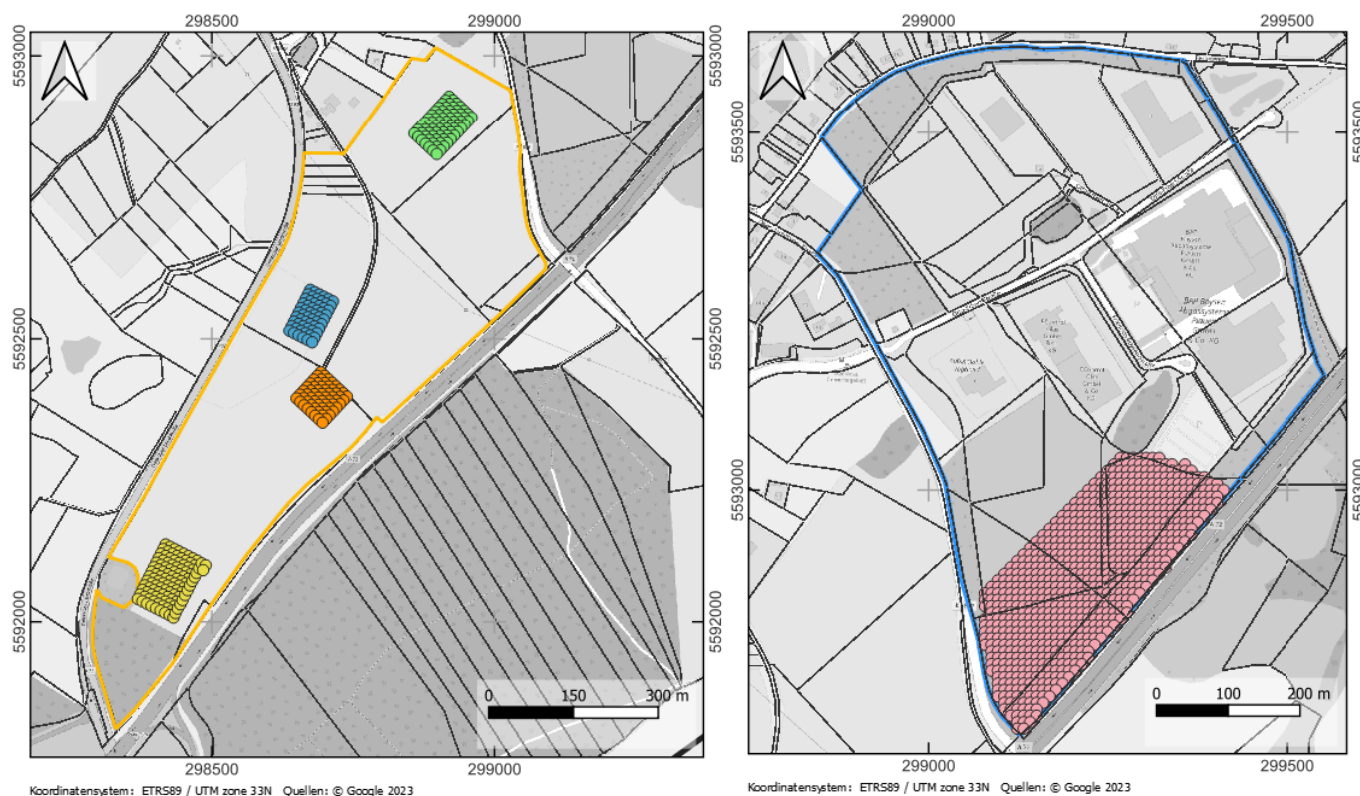


Abbildung 139: Erdwärmesondenfelder in den Beispielgebieten Oberlosa 1 (links) und 2a (rechts).

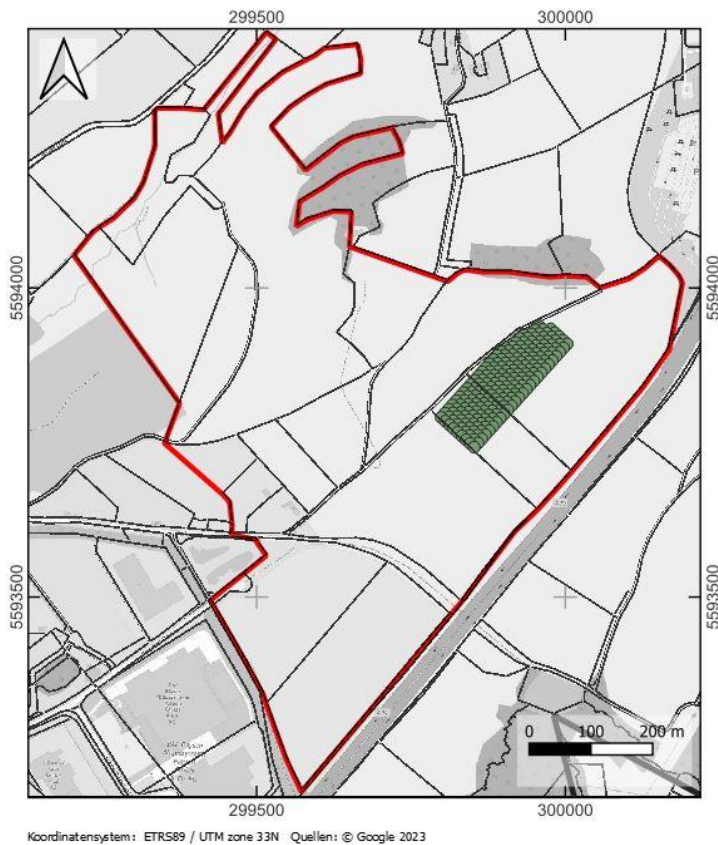


Abbildung 140: Darstellung Erdärmesondenfeld in dunkelgrün, Beispielgebietes Oberlosa 2b.

Im Beispielgebiet **Oberlosa 2b** wurden nur die bestehenden asphaltierten Straßen und Gebäude sowie die Flächen unter den Baumkronen von der Analyse der Freiflächen ausgeschlossen. Als kompaktes Sondenfeld wurde ein Bereich im Südosten des Gebietes ausgewählt. Die Berechnung dieses Gebietes erfolgte mit Oberflächennahen Sonden von 250 m Länge. Eine thermisch ausgeglichene Balance aus Wärmeeintrag und Wärmeentzug im Untergrund führt dazu, dass der Untergrund über die Betriebsjahre hinweg nicht zu stark aufgeheizt oder abgekühlt wird. In dem vorliegenden Beispiel erfolgt die Regeneration durch den bestehenden Kühlbedarf von möglichen Abnehmern sowie eine aktive Regeneration durch Rückkühler. Allerdings ist diese auch durch Abnehmer mit einem hohen Kühlbedarf möglich. Der Gesamtheizbedarf von 4798,9 MWh/a mit einer Gesamtregeneration von 4798,9 MWh/a kann durch 220 Sonden im 9 m Abstand mit je 250 m Sondenlänge abgedeckt werden. Die Abbildung 141 zeigt die mittlere Fluidtemperatur über die Betriebslaufzeit von 50 Jahren, wobei keine Abkühlung oder Aufheizung des Untergrundes stattfindet und die Grenztemperaturen nicht überschritten werden.

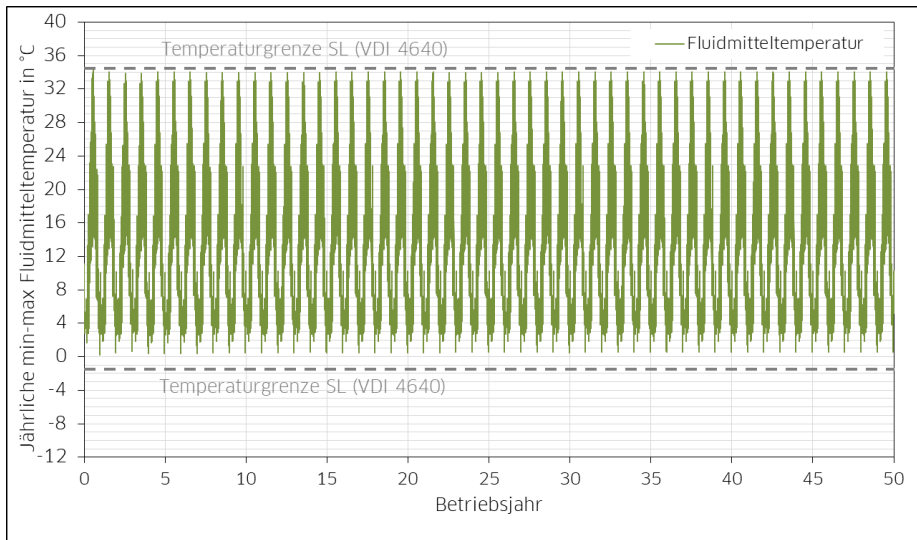


Abbildung 141: Mittlere Fluidtemperatur über die Betriebslaufzeit von 50 Jahren in Oberlosa 2b.

10.6.4 3D-thermohydrodynamische Modellierung

Zur Darstellung thermischer Wechselwirkungen einer Erdwärmearanlage und dem umliegenden Untergrund wurde für das Gebiet in Oberlosa eine 3D-thermohydrodynamische Modellierung mittels der Software FEFLOW (© DHI-WASY) durchgeführt. Bei der zu betrachtenden Flächen in Oberlosa handelt es sich um ein Gewerbegebiet, welches bisher teilweise bebaut wurde. Da die energetischen Grundlagen für die Simulation der thermischen Auswirkungen in der üblichen Form nicht vorhanden sind, bietet sich eine Betrachtung der energetischen Nutzungsmöglichkeiten auf den verfügbaren Flächen an. Insbesondere für derart große Versorgungsgebiete muss bei der Planung einer Erdwärmearanlage darauf geachtet werden, dass die thermische Untergrundnutzung ohne negative Beeinflussung von Einzelanlagen untereinander geschieht.

Die thermohydrodynamische Simulation für den Teilbereich der Quartiers Oberlosa 2a zeigt zudem, dass thermische Wechselwirkungen mit dem Untergrund nicht oder nur sehr bedingt mit vereinfachten analytischen Berechnungsansätzen abgebildet werden können. Für die Modellierung wurde das Gebiet mit dem höchsten Heizbedarf und damit auch dem größten Sondenfeld ausgewählt. Es wird die Temperaturentbreitung bei Teilregeneration durch einen bestehenden Kühlbedarf dargestellt.

Aufgrund fehlender Angaben zu einem zukünftigen Wärme- und Kältebedarf in diesem Gebiet wurden die in Kapitel 10.1 beschriebenen Ansätze von üblichen Bedarfen der geplanten Gebäudenutzungen herangezogen. Somit kann beispielhaft die Nutzung einer zentralen Erdwärmearanlage für die Bereitstellung der Energie eines Quartiers simuliert werden. Die für die Simulation verwendeten Bedarfswerte sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 56: Energetische Randbedingungen der Subsondenfelder

	Oberlosa 2a
Heizarbeit [MWh/a]	5.521,2
Thermische Regeneration [MWh/a]	2.178,1
Anzahl Sonden	768

Wie in den 3D-Simulationen der beiden weiteren Quartiere in Plauen wird als geologische Grundlage das verfügbare 3D-Modell des Untergrundes aus dem Forschungsprojekt GeoPLASMA-CE herangezogen. Die Modellgebietsabgrenzung erfolgt aufgrund der Größe des Quartiers durch modelltypische Abstände zwischen den simulierten Erdwärmesonden und der Modellgrenze. Allerdings werden geologische Störungen innerhalb des Modellgebietes vernachlässigt. Es werden die Schichtgrenzen aus dem 3D-Modell GeoPLASMA-CE in der Modellierung herangezogen, welche in diesen Bereichen verbreitet sind und mit geothermischen Messdaten aus Thermal Response Tests der Umgebung verglichen. Daraus ergeben sich die in Tabelle 57 aufgeführten lithologischen Modelleinheiten sowie deren hydrogeologische und thermische Eigenschaften (Tabelle 58). Die Abgrenzung des Modellgebietes sowie die Modell-Layer sind in der Abbildung 142 dargestellt.

Tabelle 57: Stratigrafische und lithologische Gliederung des Modells Oberlosa 2a und zugeordnete Modellkörper

Stratigrafie	Petrografie	Mächtigkeit an Sonde [m]	Modelleinheit
Holozän	Aufschüttung	2	1
Schuppenzone	Metagranite, Gneise	370	2
	Phyllit	28	3

Tabelle 58: Hydrogeologische und geothermische Eigenschaften der Modelleinheiten für das Modell Oberlosa 2a

Petrografie	hydrogeologische Eigenschaften			thermische Eigenschaften	
	hydraulische Einheit	kf-Wert (horizontal) [m/s]	nutzbare Porosität	Wärmeleitfähigkeit [W/m·K] (eff.)	vol. Wärmekapazität [MJ/m ³ ·K] (eff.)
Anthropogene Auffüllungen	GGL	1,0E-05	0,10	1,2	1,8
Metagranit, Gneis	Kluft-GWL	1,0E-05	0,02	2,4	2,3
Phyllit	Kluft-GWL	1,0E-07	0,05	2,9	2,2

Die Simulation wurde, wie oben gezeigt, mit dem Ansatz eines heizlastigen Bedarfsprofils durchgeführt. Ähnlich den zuvor durchgeführten Simulationen der Modellgebiete ergibt sich eine Abkühlung des Untergrundes in der Umgebung der Erdwärmesonden. Aufgrund der fehlenden Grundwasserströmung in

porösen Lockergesteinen ergibt sich eine radiale Ausbreitung der Temperaturfahne um das Sondennahfeld.

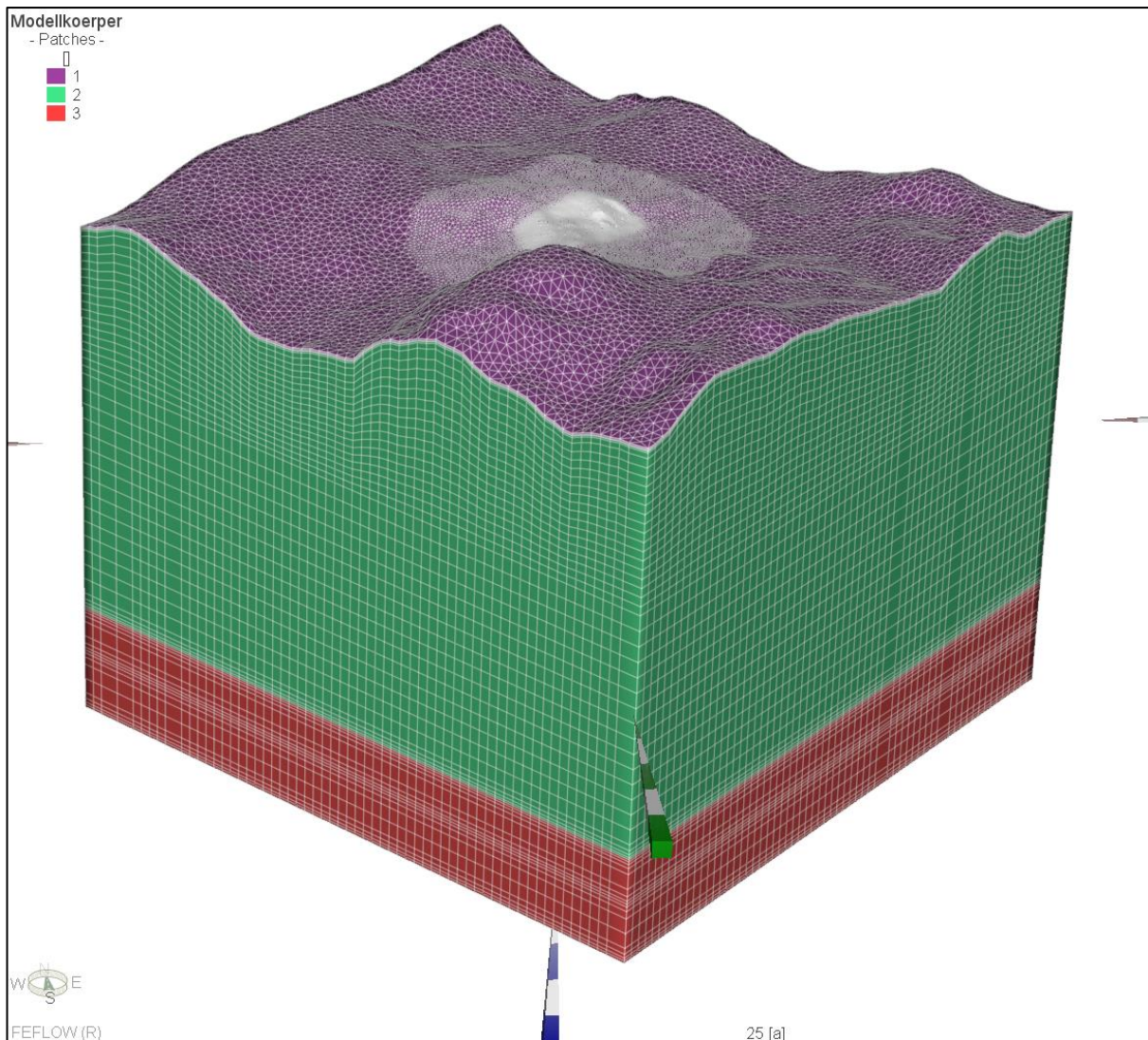


Abbildung 142: 3D-Modell des Untersuchungsgebietes mit Darstellung der Modell-Layer sowie der Vermaschung im Sondennahbereich.

In der folgenden Abbildung 143 ist die Temperaturausbreitung durch Isolinien dargestellt. Die Simulation zeigt, dass eine räumliche Betrachtung des thermischen Einflusses auf die Umgebung zusätzlich Informationen bereitstellt, die über eine Planung mittels analytischem Berechnungsverfahren nicht oder nur bedingt gezeigt werden können.

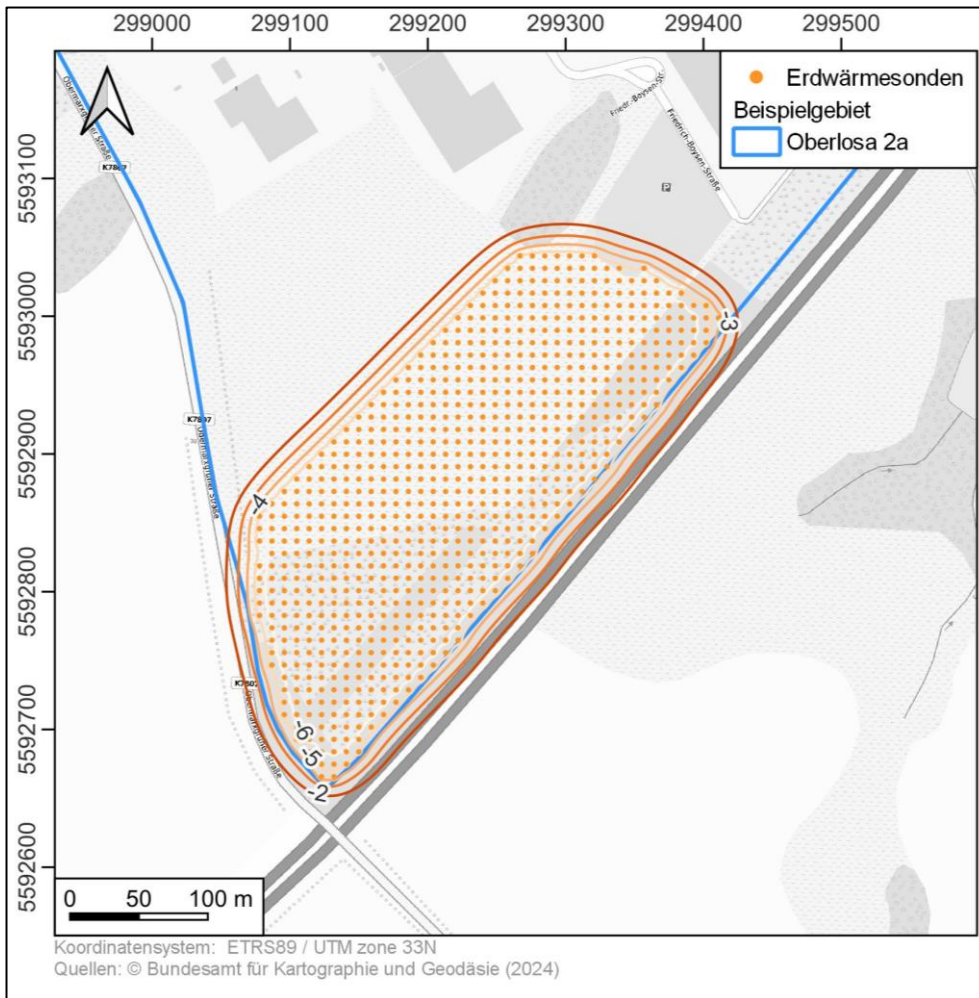


Abbildung 143: Isolinien der Temperaturdifferenz im 50. Betriebsjahr, Modell Oberlosa 2a.

10.7 Technische Dimensionierung

Die in Kapitel 10.5.4 erläuterte Vorzugsvariante wird im Folgenden technisch dimensioniert. In der Abbildung 144 ist zunächst die Bilanzgrenze des betrachteten Systems schematisch kenntlich gemacht, welche in Anlehnung einer geeigneten Leistungsgrenze eines Wärmeversorgungsunternehmens von "kalter Nahwärme" positioniert wurde.

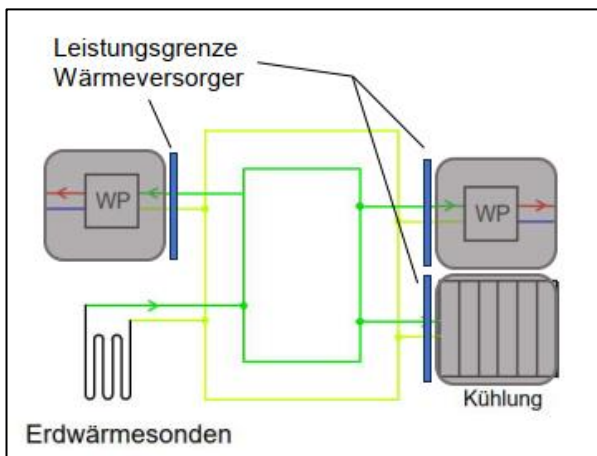


Abbildung 144: Bilanzgrenze der technischen Dimensionierung

Wärme wird den EWS entzogen, in das Kalt-Netz eingespeist und dem Verbraucher als Wärmequelle für die WP zur Verfügung gestellt. Die Leistungsgrenze liegt am Hauseintritt, sodass die WP bzw. das Kühlsystem (ausgegraut dargestellt) nicht mehr von dem Wärmeversorgungsunternehmen, sondern von dem Gebäudeeigentümer betrieben werden. Der Wärmeversorger verkauft in diesem Szenario zwar keine aufbereitete Heizwärme, bietet jedoch eine 100 %-ige erneuerbare Wärmequelle, die von dem Verbraucher mittels Wärmepumpen individuell auf die gewünschte Heiztemperatur eingestellt werden kann. Insbesondere in Industriegebieten mit sehr unterschiedlichen Temperaturanforderungen, kann dieser Ansatz sinnvoll sein.

Die Abbildung 145 stellt die Vorgehensweise zur Dimensionierung der technischen Komponenten in Form eines "Baukastensystems" dar. Die EWS werden je Teilgebiet dimensioniert (siehe Kapitel 10.6). Rückkühler kommen als Regenerationswärmequelle im Teilgebiet 2b zum Einsatz und werden für dieses dimensioniert. Für die Kalt-Netze werden Trassenmeter je Teilgebiet auf Grundlage eines Netzentwurfes angenommen. Pumpstationen je Teilgebiet dienen zur Netzumwälzung. Die Energiezentralen je Gebäude fallen nicht in den angenommenen Leistungsbereich des Wärmeversorgers und werden in der folgenden Dimensionierung der technischen Systeme und der anschließenden Wirtschaftlichkeitsgrenze nicht betrachtet.

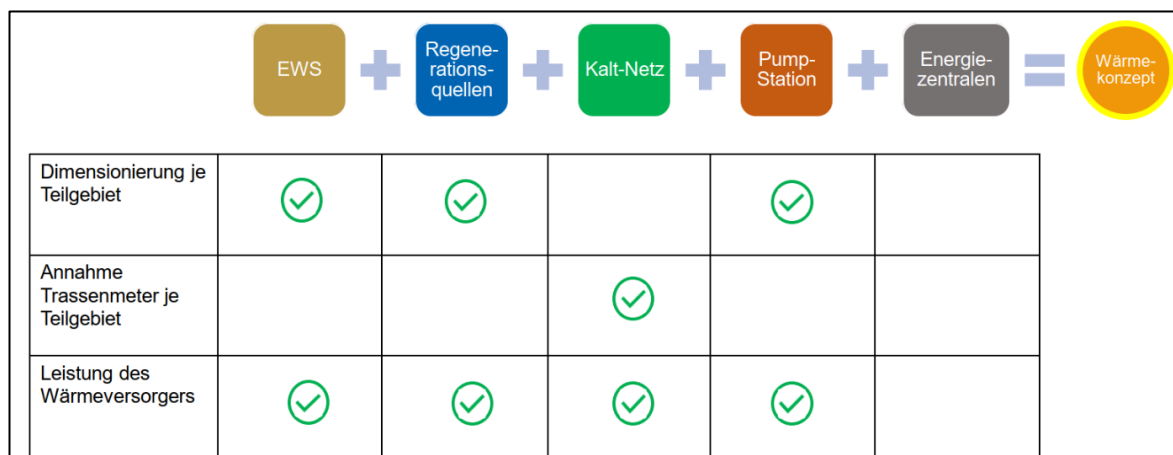


Abbildung 145: Schematisches Vorgehen zur Dimensionierung der technischen Komponenten

Dimensionierung Rückkühler

Die Dimensionierung der Rückkühler in Teilgebiet 2b erfolgt anhand der Regenerationswärmemenge (ca. 2.900 MWh), die den EWS im Sommerhalbjahr zugeführt werden muss, damit kein degressives Temperaturverhalten über mehrere Nutzungsjahre im Erdreich um die EWS entsteht. Der Dimensionierung liegt der Ansatz zu Grunde, dass die Rückkühler oberhalb einer Außentemperatur von 17 °C eingeschaltet werden. Anhand des Jahreslastganges und den möglichen Betriebsstunden wird eine erforderliche Rückkühlerleistung bemessen. Die erforderliche Gesamtleistung der Rückkühler für das Teilgebiet 2b

beträgt ca. 2,1 MW. Diese Leistung wird beispielhaft durch vier Geräte des Beispielgerätes (bei Sole: 5 °C, Luft: 20 °C) gedeckt. Eine mögliche Verortung der Rückkühler ist in Anhang A 4.4 dargestellt.

Dimensionierung Kalt-Netz

Zunächst wurde ein Netz-Entwurf je Teilgebiet erstellt. Die Leitungen wurden entlang der Straßen eingeplant. Als Datengrundlage für Teilgebiet 1 wurde der Bebauungsplan Nr. 31 vom Mai 2019 genutzt. Für Teilgebiet 2a diente Open Street Maps. Für den Netzentwurf von Teilgebiet 2b bestand die geringste Datengrundlage. Es wurde die Fortschreibung der Parzellierungs- und Erschließungskonzeption vom November 2017 genutzt.

Im Anhang 242A 4.4 sind die Netzentwürfe je Teilgebiet dargestellt. Die Trassen sind mit dem entsprechenden Leitungsquerschnitt beschriftet.

Ausgehend von der maximalen Heizleistung je Teilgebiet und einem maximalen Druckverlust von 50 Pa/m wurden die Querschnitte dimensioniert. Die Temperaturdifferenz zwischen VL und RL im Netz wurde mit 4 K angenommen. Des Weiteren wurde von dem Wärmeträger Sole (Wasser-Glykolgemisch) mit einer Konzentration von 23 % ausgegangen. Die Leistung je Hausanschlussleitung wurde auf 0,8 MW Wärmeleistung (Sole) bemessen. Berücksichtigt wurde auch bei der Querschnittdimensionierung, dass bei Bedarf die Möglichkeit besteht, die drei Teilgebiete zu einem übergreifenden Kalt-Netz zu verbinden.

In Tabelle 59 sind die Ergebnisse der Dimensionierung in Trassenmeter (nur VL) aufgelistet.

Tabelle 59: Oberlosa: Trassenmeter je Teilgebiet

Trassenmeter	Teilgebiet 1	Teilgebiet 2a	Teilgebiet 2b	Summe
DN	Länge [m]	Länge [m]	Länge [m]	Länge [m]
250	342	645	435	1422
300	311	0	0	311
400	1036	0	721	1757
450	0	771	0	771
Summe	1689	1416	1156	4261

Der Inhalt der Kalten-Netze aller drei Teilgebiete wird auf ein Gesamtvolumen von ca. 680 m³ berechnet. Das erforderliche Tiefbauvolumen beträgt ca. 15.000 m³.

Pump- und Regelstation

In einem Kalt-Netz dient eine Pump- und Regelstation zur Netzumwälzung und Regelung des Wärmemanagements, d.h. der Regelung des Volumenstromes der EWS-Felder, Rückkühler und des Netzes selbst. Je Teilquartier wird eine Pump- und Regelstation mit den folgenden Hauptkomponenten bemessen (Tabelle 60).

Tabelle 60: Oberlosa: Hauptkomponenten Pump- und Regelstationen je Teilquartier

Hauptkomponenten	Kennwerte
Pumpen	
Anzahl	3
Förderhöhe	30 m
Volumenstrom	800 m ³ /h (in Summe)
Druckhaltung	
Anzahl	3
Volumen	9 m ³ (in Summe)

Des Weiteren werden Kosten für Heizkreisverteiler, Elektro- und MSR-Technik, sowie für den Hochbau pauschal bemessen. Die erforderliche Grundfläche der Pump- und Regelstation je Teilquartier beträgt ca. 15 x 15 m.

10.8 Energiebilanz

Die Bilanzgrenze der Speisung des Kalt-Netzes variiert leicht zu den vorangegangenen Beispielgebieten. In Oberlosa wird angenommen, dass dezentrale Wärmepumpen die Heizwärme auf Heizungsvorlauftemperatur-Niveau von 42-65 °C in Abhängigkeit der Außentemperatur bereitstellen. Daraus resultiert ein geothermischer Bedarf. Kühlbedarfe wurden ebenfalls angenommen. Hochtemperatur-, Prozesswärme- und Kryo-Anwendungen wurden nicht mitberücksichtigt. Die Warmwasserbereitung ist außerhalb der Bilanzgrenze.

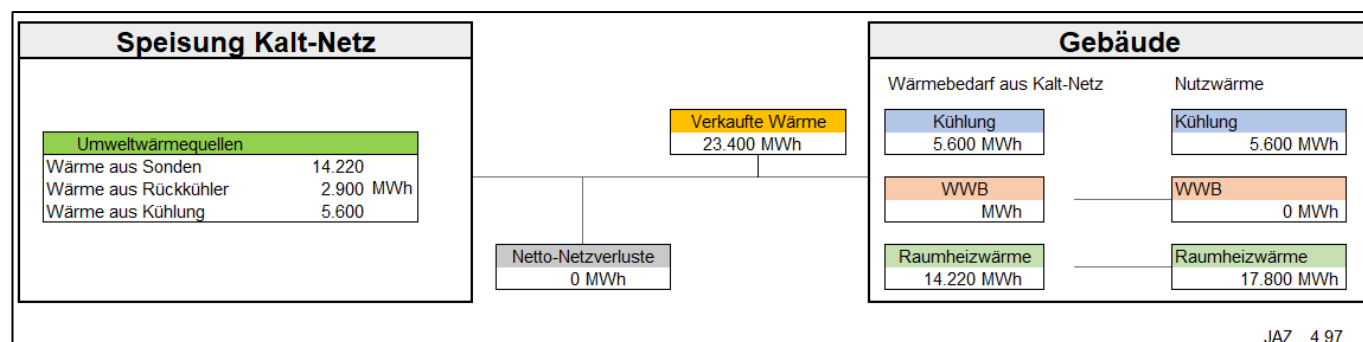


Abbildung 146: Oberlosa: Energieflussschema (Ergebnisse der Simulation)

Wie in Abbildung 146 zu erkennen ist, werden den EWS 14.220 MWh Wärme entzogen und 8.500 MWh Wärme wieder regeneriert. Es stehen 5.600 MWh zur Regeneration durch Gebäudekühlung zur Verfügung. Ein elektrischer Anteil der Kühlung, der durch evtl. Pumpen oder Kompression anfällt, wird nicht beaufschlagt. Die Wärmepumpen können somit eine Jahresarbeitszahl von ca. 5 erreichen. Die Energiebilanz des Untergrundes (für das Gesamte Gebiet Oberlosa) ist nicht ausgeglichen, im Jahresverlauf wird dem Boden lokal mehr Energie entzogen als zugeführt. Das beeinflusst langfristig die Untergrund- und somit auch die Fluidtemperaturen.

Fluidtemperaturentwicklung

Die Energiebilanz ist, wie bereits dargestellt, heizlastig. In Kapitel 10.6.3 sind die Ergebnisse der geothermischen Dimensionierung je Teilgebiet dargestellt. Oberlosa 2b wurde als thermisch ausgeglichen simuliert. Dem Sondenfeld des Teilgebietes 2b wird jedes Jahr folglich so viel Wärme wieder zugeführt, wie zuvor entzogen wurde. In Oberlosa 1 und 2a wurde eine, über das Jahr hinweg unausgeglichene, Energetik simuliert.

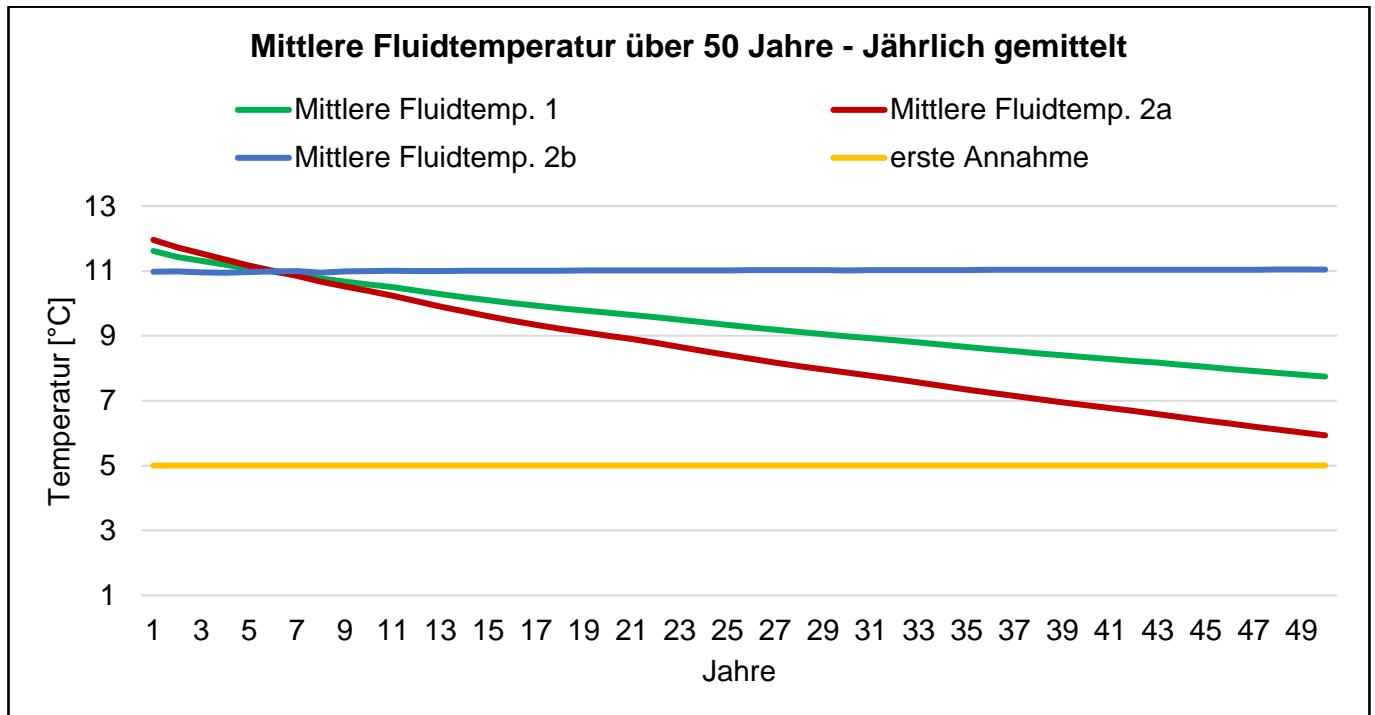


Abbildung 147: Fluidtemperatur Entwicklung über 50 Jahre - Jahresmittelwerte

Die Effekte der verschiedenen simulierten Energetiken sind in Abbildung 147 dargestellt. Als Indikator wurden die Jahresmitteltemperaturen der Fluide berechnet. Grundlage der berechneten Fluidtemperaturen sind die Gebäudelastgänge und die EED-Simulation. Die genaue Vorgehensweise (Iteration) bei der Näherung der Fluidtemperaturen wurde in Kapitel 6.1.1 erläutert.

Als erste Annahme (Startwert) wurde ganzjährig und über 50 Jahre hinweg eine Quelltemperatur von 5°C für alle Teilgebiete vorausgesetzt. Mit dieser Grundlage wurden die Wärmepumpen und die Entzugsleistungen simuliert. Es ergibt sich in der EED-Simulation eine Fluidtemperatur, die die Belastung des Untergrundes berücksichtigt (siehe Abbildung 49). Diese Fluidtemperaturen können nun wiederum im Modell hinterlegt werden um die Simulation der Wärmeerzeuger realistischer abbilden zu können. Das Ergebnis der EED-Simulation ist in Abbildung 147 für jedes Teilgebiet in Oberlosa dargestellt. Zu erkennen sind die zwei thermisch nicht ausgeglichenen Gebiete, die durch den höheren Wärmeentzug, über 50 Jahre, einen kontinuierlichen Temperaturabfall erfahren. Das Teilgebiet Oberlosa 2a reagiert sensibler auf die fehlende externe Regeneration, da das zusammenhängende Sondenfeld durch seine

geringere umspannte Fläche auch weniger vom Untergrund regeneriert wird, als die kleineren Sondenfelder im Teilgebiet 1. Die kleinen Teil-Sondenfelder haben ein größeres A/V-Verhältnis von umspannter Fläche (A) und umspanntem Volumen (V), wodurch mehr Wärme aus dem umgebenden Untergrund die Sondenfelder regeneriert. Der Untergrund kühlt in Oberlosa 1 und 2a über den Betrachtungszeitraum ab, unterschreitet dabei aber nicht die genehmigungsrechtliche Temperaturgrenze. In Oberlosa 2b kann die Quelltemperatur im Jahresmittel durch die Regeneration konstant gehalten werden.

Die Größe und der Einfluss der Abweichung der Quelltemperatur der ersten Annahme (Abbildung 148) und des ersten Iterationsdurchlaufes werden im Folgenden erläutert. Es ist eine vermeintliche Differenz zwischen der ersten Annahme (Startwert) und des ersten Iterationsdurchlaufes zu erkennen. Die Mittelwerte stellen Jahresmittelwerte ungeachtet der Bedarfslastgänge dar. So werden höhere Lasten (Heizperiode) üblicherweise bei niedrigeren Quelltemperaturen gefordert.

Die in Abbildung 148 dargestellten Werte wurden mit den Bedarfen zur jeweiligen Stunde gewichtet. Somit kann aufgezeigt werden, bei welcher Fluidtemperatur am häufigsten Wärme entzogen wird. Die gewichteten Stundenwerte wurden zu Jahresmittelwerten summiert und über 50 Jahre dargestellt.

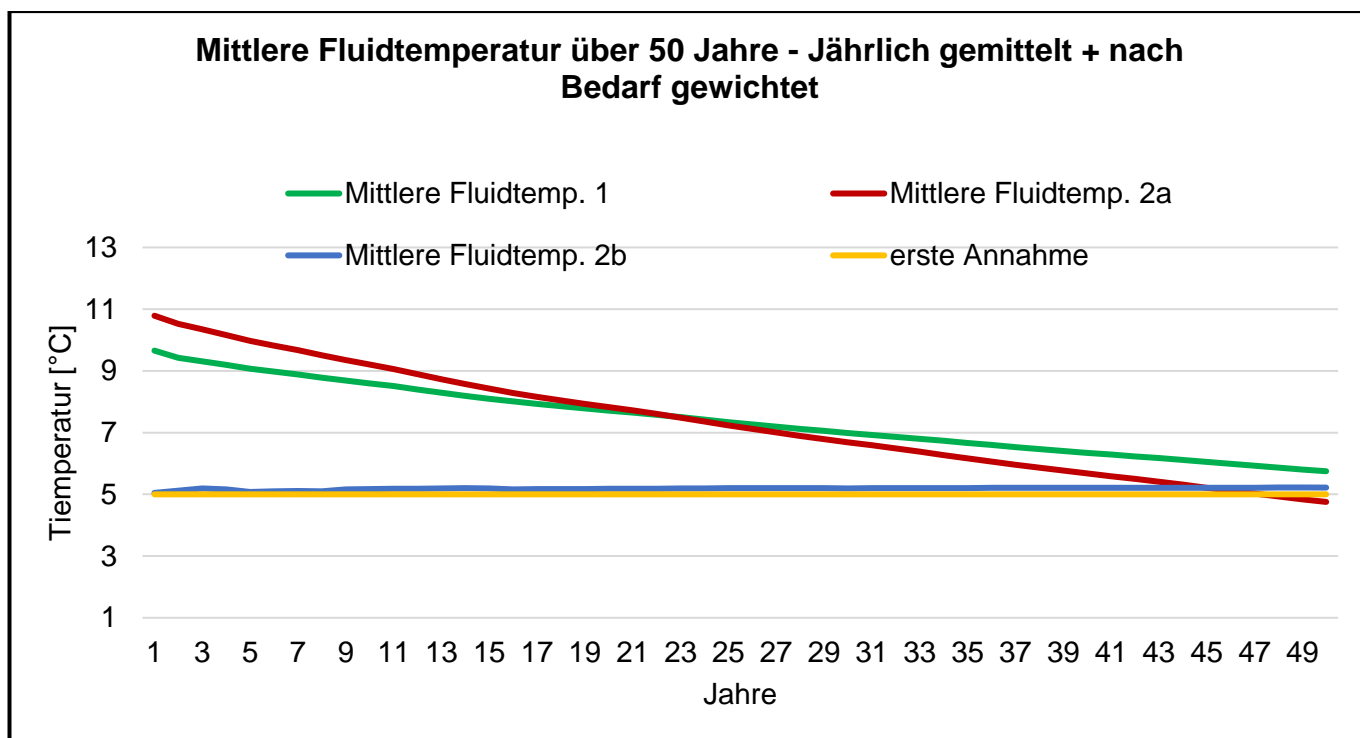


Abbildung 148: Fluidtemperatur Entwicklung über 50 Jahre - Jahresmittelwerte Bedarfsgewichtet

In Abbildung 149 wurden, ähnlich zur vorangegangenen Abbildung, die mittleren Fluidtemperaturen der ersten Annahme (Startwert) und der ersten EED-Simulation dargestellt, jedoch vorher nach dem Bedarf gewichtet. Die gewichteten Mittelwerte liegen unter den ungewichteten Mittelwerten, höhere Wärmebedarfe müssen durch die Wärmepumpen meist bei niedrigeren Quelltemperaturen gedeckt

werden. Die erste Annahme (Startwert) von 5 °C ganzjährig trifft im Jahresmittel ziemlich genau ($\pm 0,1$ K) den Wert nach der ersten EED-Simulation von Oberlosa 2b. Die Teilgebiete 1 und 2a erreichen die 5 °C ca. erst nach 50 Jahren.

Die Jahresstrombezüge der Wärmepumpen können nach der EED-Simulation noch einmal berechnet werden. Da die Quelltemperatur für Oberlosa 1 und 2a mit 5 °C ganzjährig zu niedrig angesetzt wurde, wird ein niedrigerer Strombezug erwartet. Die Abweichung in Oberlosa 2b sollte sehr gering ausfallen.

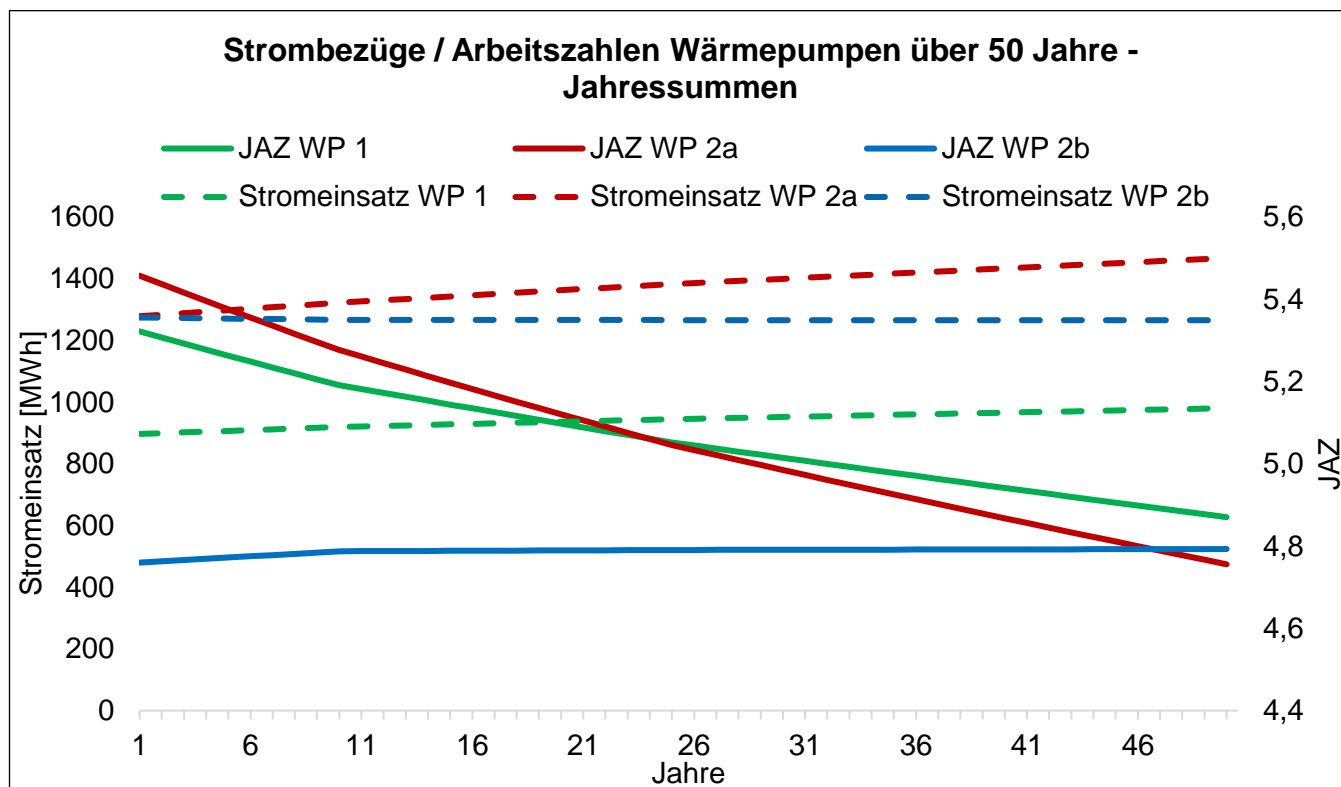


Abbildung 149: Strombezüge / Jahresarbeitszahlen Entwicklung über 50 Jahre

Die Abbildung zeigt die Strombezüge der Teilgebiete in Oberlosa. Durch die sinkenden Quelltemperaturen in der Langzeit-Simulation der thermisch unausgeglichene Teilgebiete 1 und 2a sinken auch die Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen. Bei gleichbleibendem Bedarf erhöhen sich aus diesem Grund die Jahressummen der Stromaufnahmen. Das Teilgebiet 2b weist durch die 100 %-ige Regeneration konstantere Quelltemperaturen und folglich, über 50 Jahre, auch konstante Arbeitszahlen und Strombezüge auf. In der Tabelle 61 sind die Fluidtemperaturen und der Stromeinsatz tabellarisch gegenübergestellt.

Tabelle 61: Oberlosa: Entwicklung und Einfluss der Fluidtemperaturen über 50 Jahre

Entwicklung und Einfluss Fluidtemperatur über 50 Jahre													
Jahr	Mittlere Fluidtemperatur			Mittlere Fluidtemperatur Bedarfsgewichtet			Stromeinsatz Zentrale Wärmepumpe						
	1	2a	2b	1	2a	2b	1		2a		2b		
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	
1	11,6	12,0	11,0	9,7	10,8	5,0	995,6	896,8	1.455,4	1.278,4	1.265,0	1.274,0	
10	10,6	10,4	11,0	8,6	9,2	5,2	995,6	919,3	1.455,4	1.283,3	1.265,0	1.273,2	
25	9,3	8,4	11,0	7,3	7,2	5,2	995,6	944,6	1.455,4	1.288,1	1.265,0	1.272,4	
50	7,7	5,9	11,0	5,7	4,8	5,2	995,6	979,9	1.455,4	1.293,0	1.265,0	1.271,5	
			Mittelwert (50 Jahre)					995,6	943,0	1.455,4	1.379,7	1.265,0	1.266,7
			Abweichung vom 5°C-Ansatz					-5,28%		-5,20%		0,14%	

10.9 Investitionskosten

In der Abbildung 150 sind die Investitionskosten der Vorzugsvariante (Variante 3), in netto dargestellt. Die Investitionssumme ohne Berücksichtigung von Förderung beträgt ca. 66 Mio. €. Ca. 80 % der Investitionskosten nehmen die geothermischen Erdwärmesondenanlagen mit ca. 53 Mio. € ein. Weit dahinter, an zweiter Stelle, liegen die Investitionskosten für das Kalte Nahwärmenetz mit ca. 5,5 Mio. €. Danach folgen Planungskosten und Kosten für Pump- und Regel-Stationen zum Betreiben des Kalt-Netzes, sowie Kosten für die Rückkühler. Verbraucherseitige Energiezentralen mit Wärmepumpen sind, wie im Kapitel 10.7 beschrieben, nicht in der Bilanzgrenze enthalten.

In der Kostenschätzung für das Kalt-Netz wird von einem kompletten Neubau ausgegangen. Es sind der Rohrleitungsbau, inkl. Tiefbaukosten in Form von Erdaushub- und Verfüllungskosten enthalten, aber keine Kosten für Straßenbau berücksichtigt. Bei der Neuerschließung von Quartieren werden in der Regel im Rahmen von Tiefbaumaßnahmen gleichzeitig mehrere Medien wie Trinkwasser, Abwasser, Strom und Telekommunikation verlegt, was eine Reduktion der Tiefbaukosten je Gewerke bewirkt. Diese Effekte wurden nicht bei der Berechnung der Tiefbaukosten für das Kalt-Netz berücksichtigt.

Die Kosten für Geothermie enthält u.a. die Herstellung der EWS, die Herstellung von Verteilerschächten und Anbindeleitungen inkl. Tiefbau.

Unter Berücksichtigung der BEW-Förderung, gemäß Modul 2 (siehe Kapitel 7) besteht die Möglichkeit, bis zu 40 % der Investitionskosten für erneuerbare Wärmeerzeuger und Wärmenetze zurückgezahlt zu bekommen. Die erforderliche Investitionssumme kann sich unter der Maßgabe, dass alle förderrelevanten Themenstellungen eingehalten werden, auf ca. 40 Mio. € reduzieren. Investitionskosten unter Berücksichtigung der BEW-Förderung werden in Abbildung 150 in hellblauen Balken dargestellt.

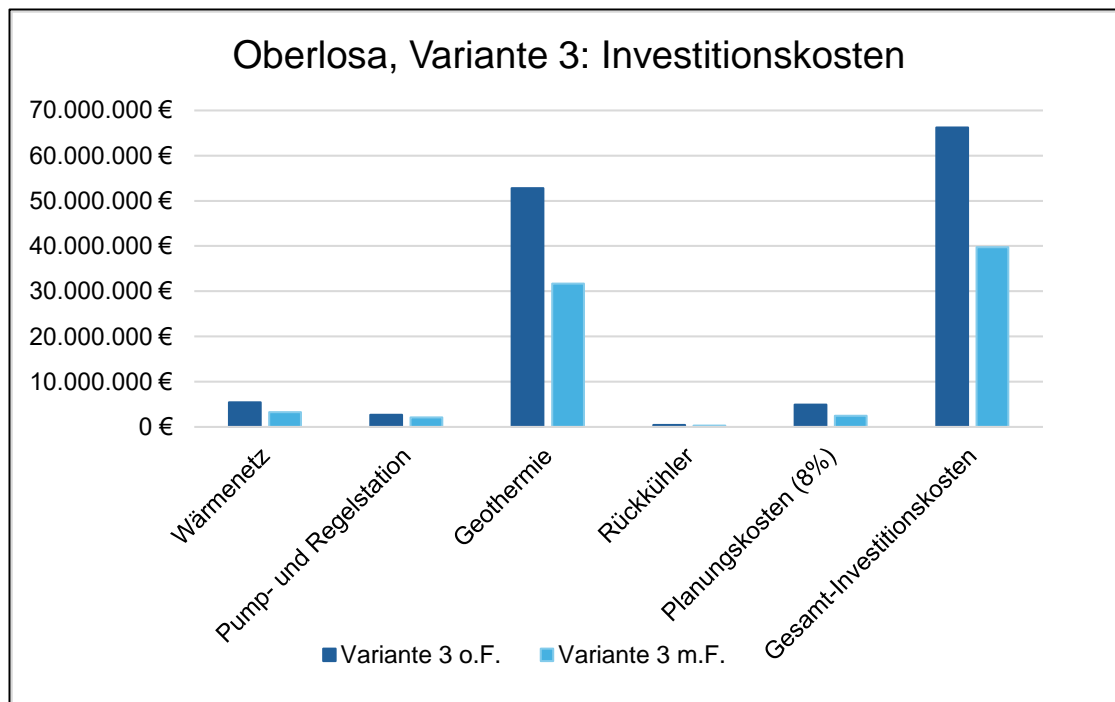


Abbildung 150: Oberlosa, Variante 3: Investitionskosten mit und ohne BEW-Förderung

Da die Investitionskosten der geothermischen Anlagen einen Anteil von ca. 80 % einnehmen, soll im Folgenden eine differenzierte Betrachtung je Teilgebiet erfolgen. Wie in Kapitel 9.6 erläutert, wurden die EWS-Felder je Teilgebiet anhand unterschiedlicher Maßgaben dimensioniert und betrieben. Eine Zusammenfassung ist in Tabelle 62 dargestellt. Hauptunterschied sind der Regenerationsanteil und Sondenanordnung. Im Teilgebiet 1 und Teilgebiet 2a erfolgt lediglich mittels Gebäudekühlung die Regeneration der EWS und erreicht einen Anteil von 39 % an der entzogenen Wärme zum Heizen. Im Teilgebiet 2b hingegen wird mittels Luftwärmenutzung zu 100 % regeneriert.

Tabelle 62: Oberlosa: Auswertung Investitionskosten Geothermie

Teilgebiete	1	2a	2b
Wärmeentzug Heizen [MWh/a]	3.777	5.521	4.799
Regeneration durch Gebäudekühlung	x	x	x
Regeneration durch Rückkühlwerke	-	-	x
Gesamt-Regeneration [MWh/a]	1.490	2.178	4.799
Regenerationsanteil	39%	39%	100%
Sondenanzahl	320	768	220
Bohrtiefe [m]	400	400	250
Bohrmeter [m]	128.000	307.200	55.000
Sondenanordnung	4 Teilfelder	1 Einzelfeld	1 Einzelfeld
Kosten Geothermie [€]	13.775.000	33.059.000	5.950.000
Kosten Rückkühlwerke [€]	-	-	416.000
Kosten Geothermie je Wärmeentzug [€]			
Heizen [€/MWh] 20 Jahre	182	299	62

Das Diagramm in Abbildung 151 verdeutlicht die Auswirkung der spezifischen Investitionskosten (Quotient aus Investitionskosten dividiert durch entzogene Wärmemenge aus EWS über 20 Jahre) in Abhängigkeit von Anordnung und Regenerationsanteil. Die Ergebnisse zeigen, dass die spezifischen Kosten in Teilgebiet 1 (4 Teilfelder) ca. 40 % niedriger sind als in Teilgebiet 2a (1 Einzelfeld). Des Weiteren zeigt sich, dass die spezifischen Kosten in Teilgebiet 2b (100 % Regeneration) ca. 80 % niedriger sind als in Teilgebiet 2a (39 % Regeneration).

Deutlich wird, dass durch Aufteilung von EWS-Feldern oder Maximierung des Regenerationsanteils die Investitionskosten signifikant reduziert werden können. Unter Hinzunahme der Investitionskosten der Rückkühlwerke steigen im Teilgebiet 2b die spezifischen Kosten lediglich von ca. 62 auf ca. 66 €/MWh Wärmeentzug.

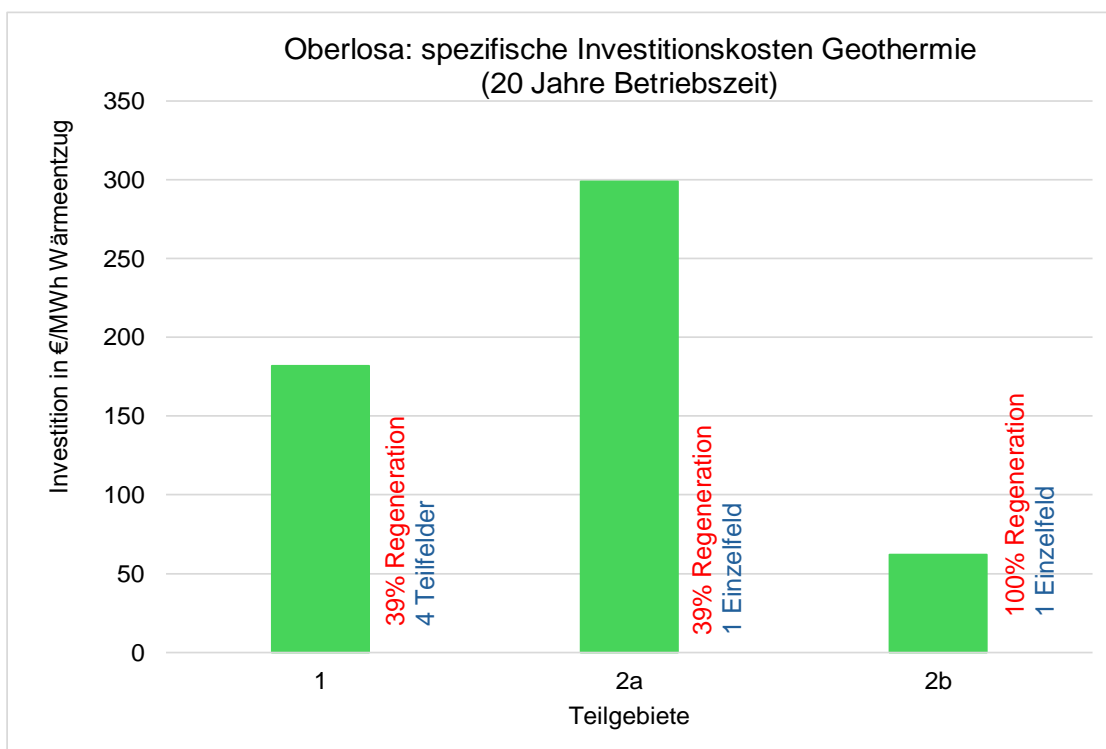


Abbildung 151: Oberlosa: spezifische Investitionskosten Geothermie, je Teilgebiet

10.10 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung der Wärmeversorgung erfolgt anhand einer dynamischen Investitionsrechnung nach der Kapitalwertmethode. Cashflows der Zukunft werden dafür abgezinst. Die Annahmen der beeinflussenden Faktoren sind im Kapitel (6.1.4) Annahmen beschrieben. Eine Auflistung der Berechnungsergebnisse befindet sich in Anhang A 3.2

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird über eine Dauer von 20 Jahren vorgenommen.

Die Investitionskosten wurden im vorangegangenen Kapitel erläutert. Die Betriebskosten setzen sich zusammen aus den Bezügen für Strom (ca. 101.000 €) sowie Kosten für Wartung und Instandhaltung der Anlagenteile (ca. 371.000 €). In Summe betragen die Betriebskosten berechnet für das erste Jahr ca. 472.000 €.

Unter der Maßgabe der erläuterten Annahmen betragen die Gesamtkosten über den Betrachtungszeitraum von 20 Jahren ca. 73 Mio. €. Inclusive einer Förderung für Investitionskosten gemäß BEW, Modul 2, können die Gesamtkosten über 20 Jahre auf ca. 46 Mio. € gesenkt werden. In der Abbildung 152 ist der Anstieg der Gesamtkosten über den Betrachtungszeitraum dargestellt. Aufgrund der sehr hohen Investitionskosten gegenüber niedrigeren Betriebskosten entsteht ein sehr flacher Anstieg.

Mittels Division der Gesamtkosten über 20 Jahre durch die Summe der vom Kunden bezogenen Wärme und Kälte (Leistungsgrenze Gebäudeeintritt) werden im Folgenden die Wärmegestehungskosten berechnet. Die Wärmegestehungskosten belaufen sich ohne Förderung auf 18,4 Ct/kWh, bzw. auf 11,7 Ct/kWh inklusive der genannten Förderung. Deutlich zeigt die Abbildung 152, dass durch Verlängerung des Betrachtungszeitraums die Gesamtkosten nur gering ansteigen. In Anbetracht des hohen Kostenanteils der EWS und deren durchschnittlicher Lebensdauer von deutlich mehr als 40 Jahren, werden die Wärmegestehungskosten über einen längeren Betrachtungsraum deutlich sinken.

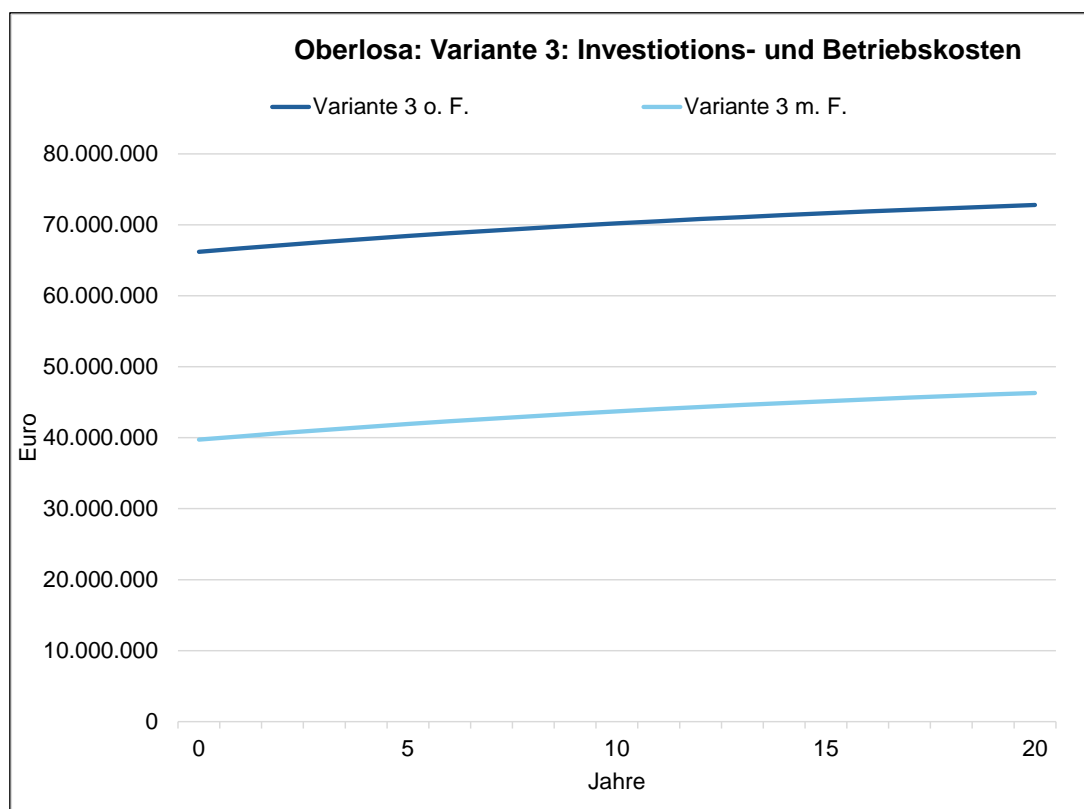


Abbildung 152: Oberlosa, Variante 3: Investitions- und Betriebskosten

10.11 Fazit Beispielquartier Oberlosa

Das Gewerbegebiet Oberlosa wurde bzgl. der Nutzung oberflächennaher Geothermie zur Quartierswärmeversorgung untersucht. Da das Gebiet überwiegend unerschlossen ist, ist unklar, welche Charakteristika das Bedarfsprofil des Quartiers in der Zukunft haben wird. Zusammen mit der Stadt Plauen wurden Annahmen über die potenziellen Anteile von Produktion, Logistik und Büro getroffen und darauf aufbauend Bedarfe für Wärme und Kälte berechnet. Unter Annahme einer Bebauungsrate von 30 % der vermarktbar Grundstücksfläche wurden verhältnismäßig hohe Bedarfe für Heizwärme (ca. 17,9 GWh/a) und Gebäudekühlung (ca. 5,6 GWh/a) bezogen auf eine Gebietsfläche von ca. 0,92 km² abgeschätzt.

Die Potenzialanalyse der oberflächennahen Geothermie, Luftwärmenutzung und PV-Stromerzeugung ergab ebenso eine hohe Potenzialdichte von verfügbarer Umweltenergie.

Neben dezentralen Wärmeversorgungssystemen wurde die Installation eines Kalt-Netzes zur Wärmeverorgung untersucht und als Vorzugsvariante ausgewählt. Das Konzept bietet eine Wärmeversorgung, welche zu 100 % aus erneuerbaren Quellen gespeist wird und vielseitige Vorteile zum quartiersweiten Wärmebedarfs- und Wärmepotenzialmanagements bietet. Dezentrale WP je Verbraucher dienen dabei der individuellen temperierten Heizungswärme.

Sowohl die Dimensionierung der technischen Komponenten, als auch der EWS-Felder erfolgte in den drei Teilgebieten 1, 2a und 2b separat. Die geothermische Dimensionierung bildete unterschiedliche Anordnungs- und Regenerationsszenarien ab, wodurch signifikante Unterschiede in den erforderlichen Investitionskosten resultieren.

Die Gesamt-Investitionskosten des Wärmekonzeptes betragen ca. 66 Mio. €. Ca. 80 % der Investitionskosten fordern die geothermischen Anlagen. Die unterschiedlichen Dimensionierungs-Szenarien der Teilgebiete zeigen, dass die spezifischen Investitionskosten je MWh entzogener geothermischer Wärme in Teilgebiet 1 (4 Teilfelder) ca. 40 % niedriger sind als in Teilgebiet 2a (1 Einzelfeld). Des Weiteren zeigt sich, dass die spezifischen Kosten in Teilgebiet 2b (100 % Regeneration) ca. 80 % niedriger sind als in Teilgebiet 2a (39 % Regeneration). Die Berechnungsergebnisse heben somit hervor, dass eine Aufteilung von EWS-Feldern oder eine Maximierung des Regenerationsanteils zur Investitionskostenreduzierung angestrebt werden sollten.

Unter Annahme eines Betrachtungszeitraumes von 20 Jahren werden Wärmegestehungskosten von ca. 18,4 Ct/kWh berechnet. Bei erfolgreicher BEW-Förderung gemäß Modul 2, könnten die Wärmegestehungskosten auf ca. 11,7 Ct/kWh reduziert werden.

11 Einfluss von Grundwasserströmung in einem fiktiven Quartier

Der Betrieb von Erdwärmeanlagen stellt in Abhängigkeit geologischer und hydrogeologischer Standortfaktoren einen thermischen Eingriff in den umliegenden Untergrund und das Grundwasser dar. Während beim Heizen Wärme dem Untergrund entzogen wird, erfolgt beim Kühlen ein Wärmeeintrag. Im Gegensatz zur analytischen Dimensionierung von Sondenfeldern in EED kann anhand numerischer 3D-Modelle der Wärmetransport gekoppelt mit der Grundwasserströmung dargestellt werden. Die folgenden Aussagen können anhand der Ergebnisse thermohydrodynamischer Simulationen getroffen werden:

- Prognose nachbarschaftlicher Beeinflussung im Untergrund bezogen auf Grundstücksgrenzen, Erdwärmeanlagen bzw. weitere Grundwasserbenutzungen.
- Simulation thermischer Wechselwirkungen mit Untergrundbauwerken, z.B. Fernwärmeleitungen, Verkehrstunnel, Parkgaragen.
- Optimierung von Erdwärmeanlagen hoher Komplexität unter Berücksichtigung von Grundwasserströmung und saisonaler Speicherfähigkeit des Untergrundes.
- Ausweisung von Aufsuchungs- bzw. Bewilligungsfeldern im bergrechtlichen Verfahren.

Einfluss von Grundwasser

Im Festgestein dominiert die Temperaturobreitung infolge von Wärmeleitung, welche durch die geothermischen Eigenschaften des Untergrundes beeinflusst wird. Der Grundwasserfluss innerhalb von Klüften spielt eine untergeordnete Rolle in diesen Bereichen. In Lockergesteinsgebieten mit höheren Permeabilitäten und Grundwassermächtigkeiten ist der Einfluss durch Grundwasserströmung deutlicher erkennbar. Durch Wärmekonvektion bildet sich zum einen eine Temperaturfahne in Grundwasserfließrichtung aus. Zum anderen wird die Untergrundtemperatur durch das Nachströmen von Grundwasser regeneriert. Daraus resultiert eine geringere thermische Beeinflussung im Bereich des Sondenfeldes. Zur Darstellung der Fahnenausbreitung in Lockergesteinsgebieten wird das vorliegende Modell Rückert Campus (aus Kapitel 8.6.4) modifiziert, indem ein 10 m mächtiger Sand-Layer an der Modelloberkante berücksichtigt wird. Dieser wird von Grundwasser durchströmt. Es wird ein Grundwassergradient von 0,004 angenommen. Die Grundwasserströmung erfolgt von Nordwesten nach Südosten (vgl. Abbildung 153). Die geothermischen Untergrundparameter sowie die energetischen Randbedingungen des Sondenfeldes werden aus dem Modell Rückert Campus übernommen. Es handelt sich somit um 48 Bohrungen mit einer Bohrtiefe von 152 m. Somit liegt eine Referenzsimulation ohne Berücksichtigung von Grundwasserströmung vor. Die Parametrisierung der zwei Modelleinheiten ist Tabelle 63 zu entnehmen.

Tabelle 63: Hydrogeologische und geothermische Eigenschaften der Modelleinheiten für das fiktive Grundwasserströmungsmodell

	hydrogeologische Eigenschaften			thermische Eigenschaften	
Petrografie	hydraulische Einheit	kf-Wert (horizontal) [m/s]	nutzbare Porosität	Wärmeleitfähigkeit [W/m·K] (eff.)	vol. Wärmekapazität [MJ/m ³ ·K] (eff.)
Sand	Poren-GWL	1,0E-04	0,20	2,1	2,5
Diabas	Kluft-GWL	1,0E-07	0,05	1,9	2,5

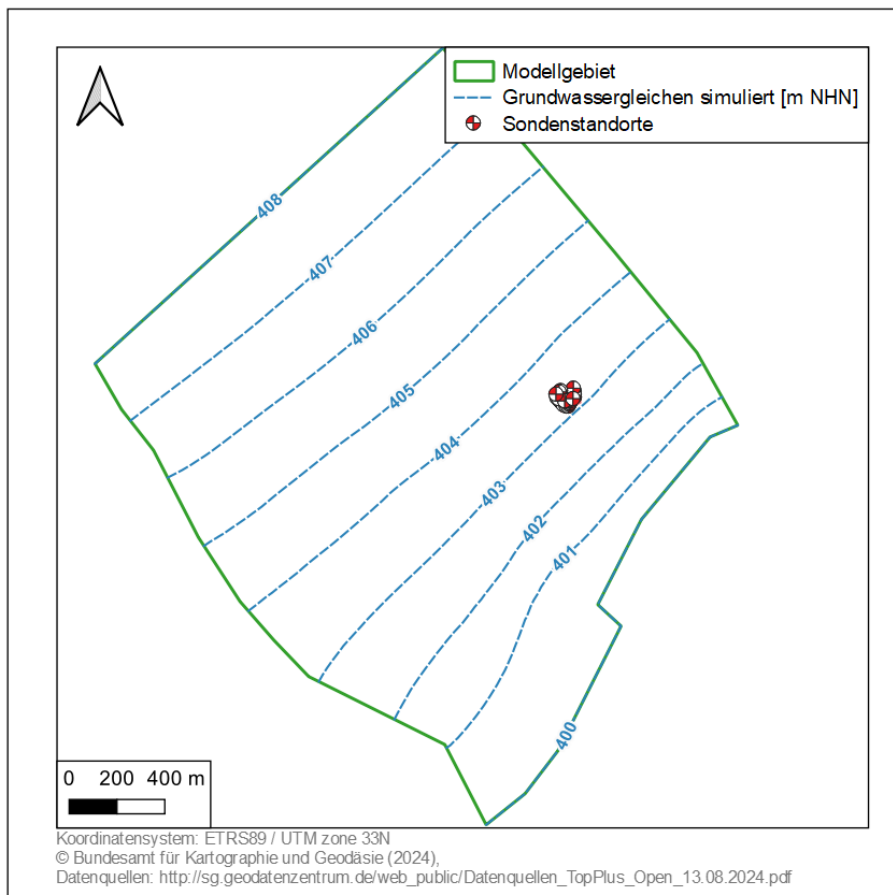


Abbildung 153: Modellgebiet mit Darstellung der im Modell angenommenen fiktiven Grundwasserdynamik

Aufgrund des heizlastigen Energiebedarfs der geplanten Anlage findet generell eine Abkühlung des Untergrundes statt. Anhand des vertikalen Temperaturschnittes durch das Sondenfeld in Abbildung 154 wird deutlich, dass die stärkste laterale Temperaturentwicklung mit höchster Temperaturabnahme innerhalb der oberflächennahen Sande (Modelleinheit 1) erfolgt. Aufgrund von Wärmekonvektion wird das abgekühlte Grundwasser stärker nach Südosten transportiert. Ebenso wird deutlich, dass der Zufluss temperierten Grundwassers zu einer Verringerung der thermischen Beeinflussung im Anstrom des Sondenfeldes führt. Im Bereich des Festgesteins nimmt die laterale Temperaturentwicklung aufgrund

des Fehlens von Grundwasserströmung ab. Die Temperaturlausbreitung wird lediglich durch Konduktion bestimmt, welche von den geothermischen Parametern des Untergrundes abhängt.

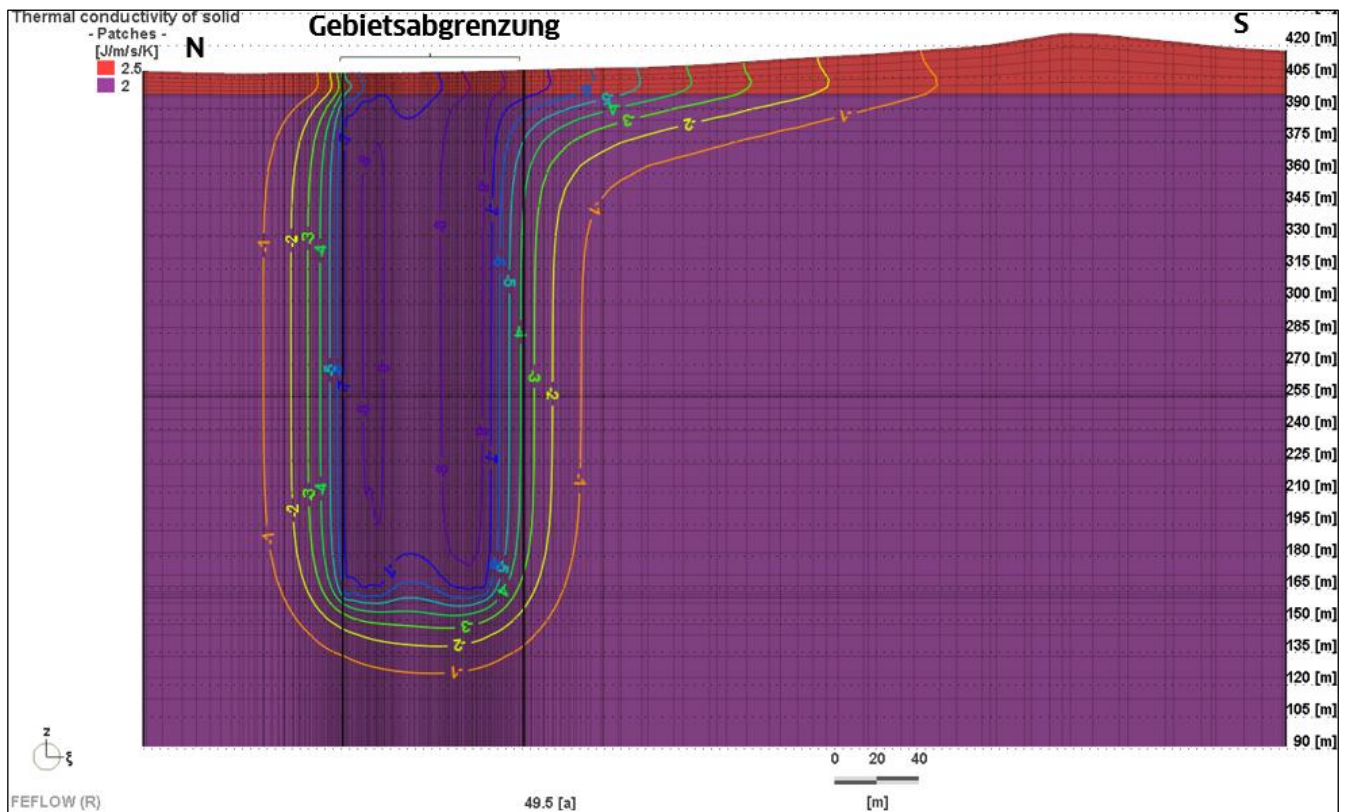


Abbildung 154: Temperaturschnitt durch das Sondenfeld für das fiktive Grundwasserströmungsmodell.

In Abbildung 6 ist die laterale Ausbreitung der Temperaturfahne im Bereich der oberflächennahen grundwasserführenden Schichten abgebildet. Die Temperatur wird in Grundwasserströmung vom Sondenfeld wegtransportiert. Die Fahne ist somit nach Südosten ausgerichtet. Die Fahne weist eine maximale Ausdehnung, bezogen auf die 1K-Isolinie, von 290 m auf.

Die Temperaturfahne geht über die Grundstücksgrenzen der Geothermieanlage hinaus. Vor allem in urbanen und dicht besiedelten Gebieten werden nachbarschaftliche Grundstücke thermisch beeinflusst. Dies bedeutet, dass auch nachbarschaftliche Bestandanlagen beeinflusst werden können bzw. das geothermische Potenzial der betroffenen Grundstücke herabgesetzt wird.

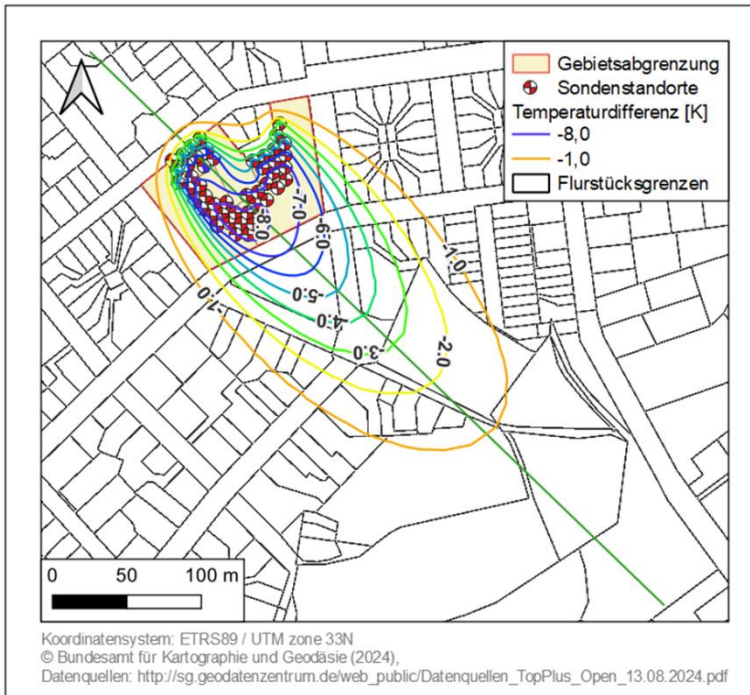


Abbildung 155: Isolinien der Temperaturdifferenz im 50. Betriebsjahr für das fiktive Grundwasserströmungsmodell (nur Heizen).

Der Einfluss von thermischer Regeneration durch Grundwasserströmung wird ebenso bei Betrachtung der Fluidtemperaturen im Sondenfeld deutlich. In Abbildung 156 sind die simulierten Fluidtemperaturen für das Sondenfeld des Rückert Campus mit bzw. ohne Grundwasserströmung dargestellt. Die Fluidtemperaturen im Modell Rückert Campus entsprechen annähernd den in EED simulierten Fluidtemperaturen bei Grundlastbetrieb. Im fiktiven Grundwasserströmungsmodell findet generell eine geringere Abkühlung statt.

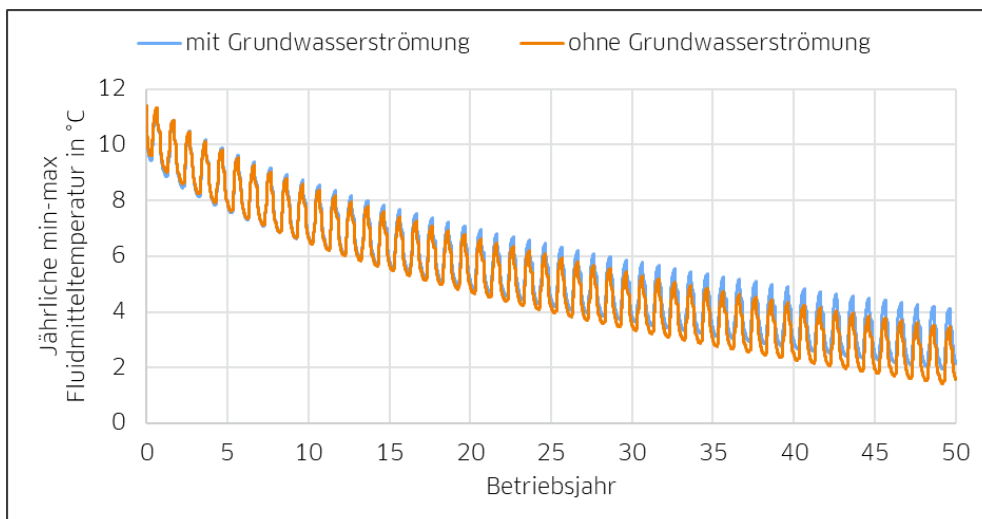


Abbildung 156: Entwicklung der mittleren Sondenfluidtemperatur über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren für das Sondenfeld Rückert Campus mit und ohne Grundwasserströmung.

Einfluss der Regeneration des Untergrundes

In einem zweiten Szenario für das fiktive Grundwasserströmungsmodell wird die Fahnenausbreitung bei Berücksichtigung eines Heiz- und Kühlbedarfs für den Rückert Campus betrachtet. Dazu wurde die energetische Variante 5 aus den EED-Berechnungen umgesetzt (Kapitel 8.6.3). In dieser Variante decken 48 Sonden mit einer Tiefe von 152 m einen Heizwärmebedarf von 361 MWh/a und einen Kühlbedarf von 180,5 MWh/a ab. Durch die Verringerung des erdseitigen Wärmeentzuges durch das Sondenfeld kommt es zu einer geringeren Abkühlung im Untergrund. Die Temperaturfahne weist eine geringere laterale Ausdehnung auf als im zuvor gezeigten heizlastigen Betrieb. Die 1 K-Isolinie ist in diesem Fall um 20 m kürzer (vgl. Abbildung 157).

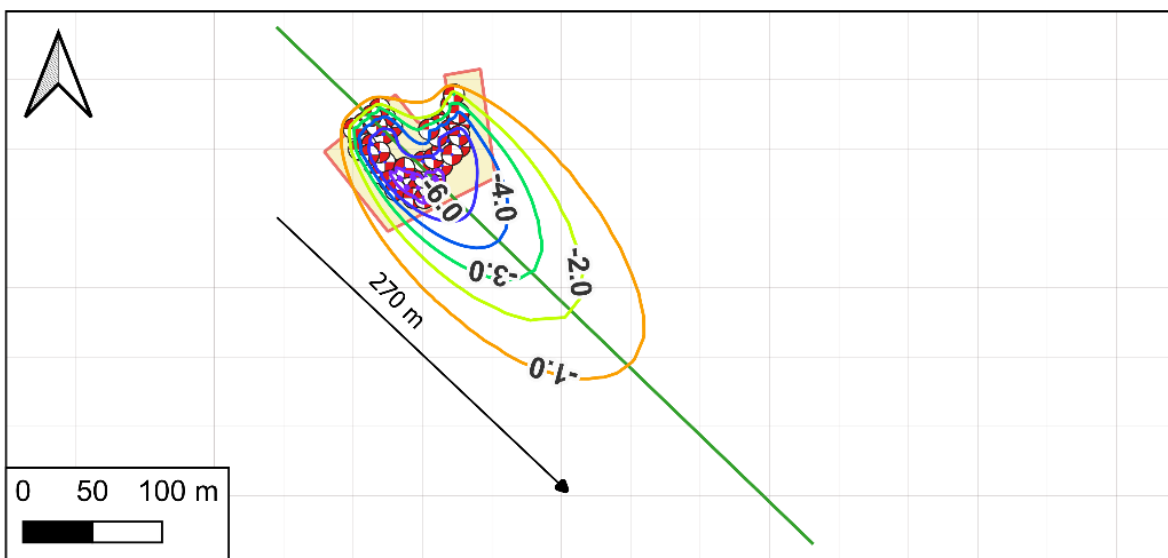
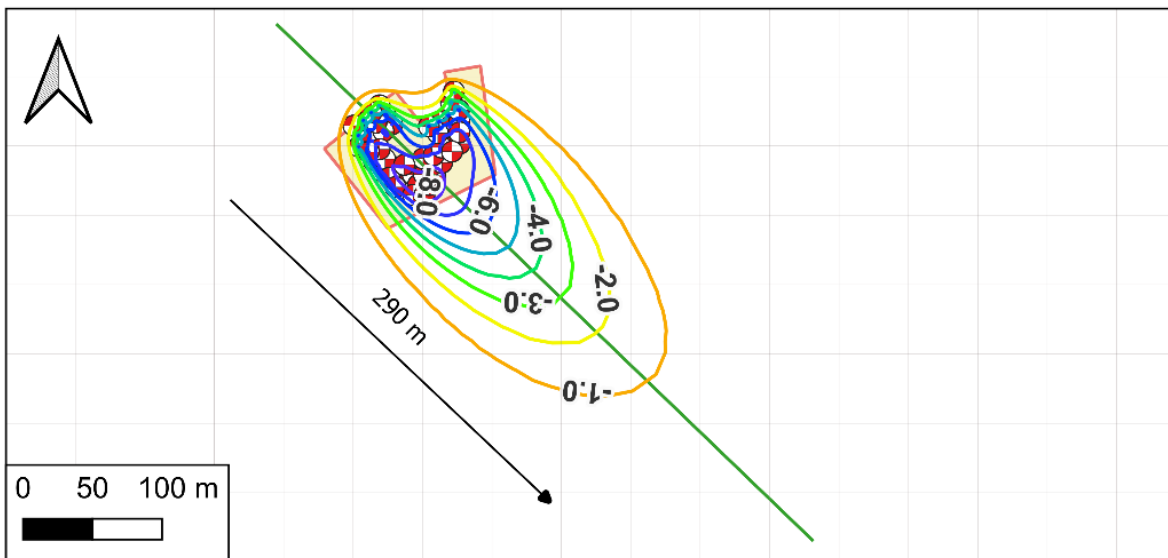
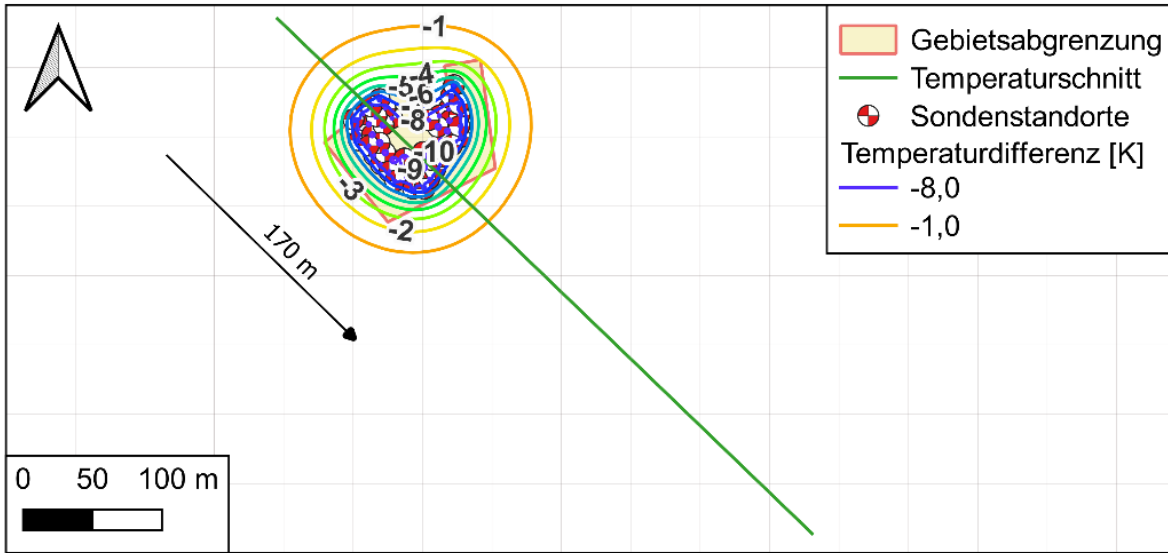


Abbildung 157: Fahnenvergleich der durchgeführten 3D-Simulationen (Oben: Variante ohne Grundwasserfluss, Mitte: Variante mit Grundwasserfluss, Unten: Variante mit Regeneration)

Schlussfolgerungen

Im Festgestein dominiert die Temperaturlausbreitung durch Konduktion. Die Temperatur breitet sich radial um das Sondenfeld aus. Die Reichweite der thermischen Beeinflussung hängt von den geothermischen Untergrundparametern Wärmeleitfähigkeit und spez. Wärmekapazität ab.

In Porengrundwasserleitern bildet sich infolge von Konvektion eine Temperaturfahne in Grundwasserfließrichtung aus. Die laterale Ausbreitung ist von den folgenden Faktoren abhängig:

- geothermische Untergrundparameter Wärmeleitfähigkeit und spez. Wärmekapazität,
- Grundwasserdynamik (Fließrichtung, Abstandsgeschwindigkeit, Grundwassermächtigkeit),
- energetische Randbedingungen des Erdwärmesondenfeldes.

Die Reichweite der thermischen Beeinflussung ist neben den Untergrund- und Grundwasserverhältnissen ebenso abhängig von der energetischen Planung der Anlage. Bei Verringerung des erdseitigen Wärmeentzuges durch den Eintrag von Regenerationswärme (Gebäudekühlung, Wärme aus Luftkühlern etc.) kann die Fahnenausbreitung und somit der Einfluss auf die Nachbarschaft verringert werden.

Bei Planung der Anlage in thermischer Balance zwischen Wärmeeintrag und Wärmeentzug breiten sich lediglich saisonal Temperaturfahnen um das Sondenfeld mit sehr geringer Reichweite aus. Die Beeinflussung nachbarschaftlicher Grundstücke kann minimiert oder sogar ausgeschlossen werden.

Im Bereich von Temperaturfahnen können nachbarschaftliche Grundstücke und somit Erdwärmeeanlagen thermisch beeinflusst werden. In der Folge wird das geothermische Potenzial der betroffenen Grundstücke herabgesetzt.

Im Rahmen der Planung von Quartieren ist die Dimensionierung großer und unregelmäßiger Sondenfelder eine komplexe Aufgabe. Eine rein analytische Dimensionierung, beispielsweise mit der Software EED, reicht oft nicht aus, um die vielfältigen Einflüsse und Wechselwirkungen im Untergrund präzise abzubilden. Daher wird empfohlen, zusätzlich 3D-Modelle zur Simulation der Sondenfelder zu verwenden. Diese Modelle berücksichtigen die spezifische (Hydro-)Geologie und die Strömung des Grundwassers.

Grundwasser spielt eine entscheidende Rolle in der thermohydrodynamischen 3D-Modellierung. Es beeinflusst den Wärmetransport im Untergrund, da es Wärme aufnehmen und weiterleiten kann. Die Strömungsdynamik des Grundwassers bestimmt die Wege und Zeiten, die für den Wärmetransport relevant sind. Zudem trägt Grundwasser zur thermischen Regeneration des Untergrunds bei, indem es Wärme

aufnimmt und verteilt, was besonders wichtig ist, um eine langfristige Effizienz der geothermischen Anlagen zu gewährleisten. Die Interaktion zwischen Grund- und Oberflächenwasser kann ebenfalls die thermischen und hydraulischen Eigenschaften des Modells beeinflussen.

Durch die Simulation in 3D-Modellen können präzise Aussagen zur Ausbildung eines Temperaturfeldes und zur nachbarschaftlichen Beeinflussung getroffen werden. Dies ist besonders wichtig, um sicherzustellen, dass die geothermischen Anlagen effizient arbeiten und keine negativen Auswirkungen auf benachbarte Systeme haben. Eine genaue Modellierung und Planung tragen somit wesentlich zur Optimierung der geothermischen Nutzung und zur nachhaltigen Wärmeversorgung in Quartieren bei.

12 Gesamtbewertung und Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht befasst sich mit der Analyse und den Nutzungsmöglichkeiten der Potenziale oberflächennaher Geothermie zum Heizen und Kühlen von Gebäuden in Quartierskonzepten. Es werden die Möglichkeiten zur Nutzung der Potenziale mittels geothermischer Systeme und der dafür notwendigen Anlagentechnik in Form von Machbarkeitsstudien beschrieben. Anhand von drei charakteristischen Beispielquartieren in und um Plauen werden drei verschiedene Wärmeversorgungs- und Quellsysteme untersucht, um exemplarisch die verschiedenen Anforderungen und Systemlösungen zu beschreiben. Die Untersuchungen fanden in enger Zusammenarbeit mit der Stadt Plauen und dem Energieversorger enviaTherm sowie dem Auftraggeber LfULG statt. Die Genehmigungsfähigkeit ist insbesondere vom Standort und dem genutzten Erschließungssystem abhängig und wird im Projekt vorausgesetzt.

Vorgehensweise

Für die drei betrachteten Beispielgebiete wurden geologische und hydrogeologische Recherchen im Rahmen einer geothermischen Machbarkeitsanalyse durchgeführt. Dabei wurden die relevanten Untergrundeigenschaften der jeweiligen Standorte, wie Untergrundtemperatur und Wärmeleitfähigkeit, bestimmt. Weiterhin wurde eine Wärme-Bedarfsermittlung auf Basis von Verbrauchsdaten und Prognose-Tools durchgeführt. Teilweise wurde dafür eine Prognose zukünftiger Bebauung erstellt. In die Betrachtung flossen grundsätzlich alle Gebäude des Gebiets ein. Anhand eines möglichen Außentemperaturverlaufs wurde ein Stundenlastgang erstellt, um Bedarfe, Wärmepumpen und Untergrundtemperaturen möglichst genau abzubilden. Im ersten Schritt wurden dafür Untergrundtemperaturen aus Messdaten und Literaturkennwerten abgeleitet, um die Wärmepumpensysteme in ihrer Effizienz bewerten zu können. Mit den daraus berechneten Entzugswärmemengen wurde anschließend eine geothermische Anlagensimulation durchgeführt um die Quelltemperatur der Geothermiesysteme und deren Entwicklung über die Betriebszeit zu approximieren. Für jedes Beispielquartier wurden verschiedene geothermische und weitere Wärmeerzeugersysteme simuliert und eine Vorzugsvariante ermittelt. Dafür wurde der Sanierungszustand und die Niedertemperaturtauglichkeit, die einen entscheidenden Einfluss auf die Wärmepumpentauglichkeit und somit die Nutzung der Geothermie hat, bewertet. Zudem wurden 3D-thermohydrodynamische Modellierungen des Untergrundes für den Betrieb von Erdwärmeanlagen aller Beispielgebiete durchgeführt, um die Temperaturveränderung im Untergrund und dessen Auswirkungen auf nachbarschaftliche Gebiete bestimmen zu können. Es wurden mögliche Versorgungsstrukturen wie z.B. Wärmenetze oder dezentrale Erzeuger untersucht und Wärmebedarfskarten (HeatMaps) erstellt. Die Einbindung weiterer Umweltwärmepotenziale wurde geprüft. Aufgrund der stündlichen Simulation kann eine vergleichsweise genaue Dimensionierung der Systeme, sowie eine Strombedarfsermittlung folgen. Es konnte eine jährliche Energiebilanz aufgestellt werden. Diese Werte dienen der

Berechnung von Investitions- und Betriebskosten bezogen auf den Betrachtungszeitraum. Es konnten im Ergebnis bereits Wärmegestehungskosten berechnet werden.

Beispielquartier Rückert Campus

Die öffentlichen Einrichtungen am Rückert-Campus befinden sich in Haselbrunn im nördlichen Plauen. Das Quartier besteht aus zwei Schulgebäuden und einem Hortgebäude, deren Heizung gegenwärtig dezentral mit Gas versorgt werden und zum Teil eine zentrale Warmwasserbereitung haben. Der Innenhof der Gebäude ist überwiegend versiegelt.

Als Vorzugsvariante wurde eine zentrale Versorgung aller Gebäude durch einen gemeinsamen zentralen Heizungskeller avisiert. Die Gebäude sollen durch eine Trasse miteinander verbunden werden. So wird nur ein Wärmepumpensystem mit einer Anbindung an die Geothermie notwendig. Geothermische Potenziale und Bedarfe liegen hier in hoher Dichte räumlich nah zueinander. Nach Evaluation der möglichen Wärmequellen zeigten oberflächennahe und tiefere Erdwärmesonden die beste Eignung, um den Energiebedarf bei niedriger Platzverfügbarkeit zu decken. In einer Dimensionierung wurden mehrere Varianten betrachtet und eine Vorzugsvariante ausgewählt. Eine 3D-thermohydrodynamische Modellierung des Untergrundes zeigt die Temperatursausbreitung im Untergrund auf.

Beispielquartier Bahnhofsvorstadt

Im Betrachtungsgebiet der Bahnhofsvorstadt befinden sich überwiegend Plattenbauten und Mehrfamilienhäuser, sowie wenige öffentliche Gebäude und Gewerbe. Ein großer Teil der Gebietsfläche ist durch Verkehrswege und Grünflächen gekennzeichnet. Es liegt bei einem Großteil der Gebäude ein Fernwärmeanschluss vor. Dieser Bauzustand ist insbesondere für Städte in den neuen Bundesländern typisch und demnach die Übertragbarkeit auf weitere Orte von Interesse.

Um die Vorteile der bereits anliegenden Fernwärme mit der Nutzung der Geothermie zu verbinden wurde eine Versorgung über ein Niedertemperaturnetz favorisiert. So ist es den Wärmepumpen ganzjährig möglich auf dem Temperaturniveau des Netzes einzuspeisen und gleichzeitig den Stromeinsatz dafür möglichst gering zu halten. Der Fernwärmeanschluss dient zur Spitzenlastdeckung und ermöglicht eine kosteneffiziente Dimensionierung der geothermischen Systeme und Wärmeerzeuger. Aufgrund des hohen Bebauungsgrades wurden Erdwärmesonden auf Freiflächen im gesamten Quartiersgebiet verteilt. In der 3D-thermohydrodynamischen Modellierung wurden verschiedene Anteile der thermischen Regeneration des Untergrundes über Wärmeeintrag gegenübergestellt, um die Temperatureinflüsse im Bereich der Sondenfelder zu vergleichen. Gleichzeitig zeigt die Simulation die Grenzen der analytischen Dimensionierung bei großen Erdwärmesondenfeldern und die Notwendigkeit komplexer Simulationsverfahren auf, da die gegenseitige Beeinflussung der Sonden zunimmt.

Beispielquartier Oberlosa

Das Beispielgebiet Oberlosa mit seinen 3 Teilgebieten 1, 2a und 2b, am südlichen Stadtrand von Plauen (Stadtteil Oberlosa) ist ein teilweise bebautes Industriegebiet entlang der Autobahn A72. Zukünftige Wärmebedarfe, zusätzlich zu der Bestandsbebauung, wurden über Flächenansätze und sich ansiedelnde Industriezweige geschätzt. Die 3 Teilgebiete sind so voneinander getrennt, dass jedes energetisch für sich betrachtet wurde.

Durch die räumliche Trennung der Potenziale und Bedarfe, das Auftreten von Kühl- und Heizbedarfen, sowie das unbekannte Temperaturniveau der sich ansiedelnden Industrie kann hier ein Kalt-Netz zur Wärmeverteilung empfohlen werden. Jeder Abnehmer kann mittels WP das Temperaturniveau des Netzes auf Heizungs-Vorlaufniveau heben oder für eventuell benötigte Prozesswärme noch höher erhitzen. Für die drei Gebiete wurden unterschiedliche Szenarien zur geothermischen Abdeckung der Wärme- und Kühlbedarfe betrachtet. Ein bestehender Kühlbedarf kann für die Regeneration des Untergrundes genutzt werden. Bei Erreichen einer thermischen Balance können die Sondenmeter signifikant reduziert werden und die Temperatur im Untergrund wird über die Betriebsdauer weder aufgeheizt noch abgekühlt. Dies wird vor allem in der 3D-Modellierung deutlich.

Bewertung

Für den Einsatz geothermischer Quellsysteme sind die hydro-/geologischen Bedingungen am Standort ausschlaggebend. Da die Eigenschaften auch kleinräumig signifikant variieren können, ist eine Untersuchung zur Machbarkeit von großer Bedeutung. Dabei werden die am Standort möglichen Optionen geprüft und die ausschlaggebenden Untergrundparameter bestimmt. Neben den geologischen Faktoren sind Platzverhältnisse und der spezifische Bedarfswert ausschlaggebend für das gewählte geothermische System.

In den drei beschriebenen Teilgebieten ist exemplarisch dargestellt, wie die geothermischen Systeme und die darauf ausgelegte Anlagentechnik der Wärmeverteilung und -erzeugung auf die jeweiligen Bedürfnisse abgestimmt wurde. Entscheidend ist dafür, welches Temperaturniveau bereitgestellt werden muss und wie es über das Gebiet verteilt werden muss.

Grundsätzlich müssen die zu versorgenden Gebäude eine Niedertemperaturtauglichkeit aufweisen um einen hohen Anteil an Umweltwärme über die WP zu nutzen und evtl. auch gesetzliche Vorgaben zu erreichen. Das Temperaturniveau der Wärmeversorgung und der Umweltquelle sollten dafür möglichst nah beieinanderliegen. Eine maximale Heizungs-Vorlauftemperatur von 55°C wird als Grenzwert zur effizienten Nutzbarkeit von EWS eingeschätzt. Die Art der Warmwasserbereitung beeinflusst diese Tauglichkeit. Für eine flächendeckende Nutzung der Geothermie in Bestandsgebäuden müssen diese zum Teil ertüchtigt werden.

Die räumliche Verteilung der geothermischen Potenziale und Bedarfe entscheidet über die zentrale oder dezentrale Versorgung. Eine hohe Bedarfsdichte ist dabei für jedes Wärmenetz von wirtschaftlichem Vorteil. Die Verwendung von Bestandsnetzen für die Verteilung von Wärme, auf einem für Wärmepumpen geeigneten Temperaturniveau, hängt von der Dämmung und dem Zustand des Netzes ab.

In den betrachteten Versorgungsvarianten erzeugt das geothermische System durch die Bohrkosten einen Großteil der Investitionskosten. Um die Realisierbarkeit dieser und vergleichbarer Projekte zu erhöhen, sollten möglichst weitere, günstig zu erschließende Umweltpotenziale zusätzlich genutzt werden. So können z.B. Rückkühler im Sommer Wärme in das geothermische Quellsystem speisen, um dieses möglichst effizient zu dimensionieren und die Quelltemperaturen hoch zu halten. PV-Anlagen sollten genutzt werden, um einen möglichst hohen Anteil der Strombedarfe zu decken. Eine monovalente Versorgung mit Geothermie, vor Allem für Bestandsgebäude, erzeugt meist hohe Investitionskosten, kann jedoch über einen längeren Betrachtungszeitraum einen Vorteil durch günstigere Betriebskosten erzeugen.

Die Anpassung der Geothermie und Anlagen an spezielle Anforderungen wie Hochtemperatur oder Kryo ist nur schwer möglich und bringt einen hohen Stromeinsatz mit sich. Eine Grundlastdeckung ist möglich und kann durch andere Wärmeerzeuger (z.B. Gas) ergänzt werden.

Bei der potentiellen Wärmerversorgung von Gebäuden mit Geothermie sind viele Einflussfaktoren, die die technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit beeinflussen zu beachten. Grundsätzlich bietet sie die Möglichkeit den Verbraucher unabhängiger von Primärenergie zu machen und Umweltwärme zu nutzen.

Literaturverzeichnis

AGEMAR, T. (2022): GeotIS - Geothermisches Informationssystem.

<https://www.geotis.de/homepage/maps>, 24. 11 2023.

AGEMAR, T., SUCHI, E., MOECK, I. (2018): Die Rolle der Tiefen Geothermie bei der Wärmewende.

<https://www.geotis.de/homepage/publications/maps/Ressourcenkarten.zip>, 24.11.2023.

BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, LANDESENTWICKLUNG UND ENERGIE (STMWI, 2024): Energie-Atlas Bayer: Oberflächennahe Geothermie - Arten der Nutzung,

https://www.energieatlas.bayern.de/thema_geothermie/oberflaeche/nutzung, 16.10.2024.

BUNDESFACHSCHULE KÄLTE-KLIMA-TECHNIK (BFS, 2024): Verbot für Kältemittel mit GWP \geq 2500.

https://www.bfs-kaelte-klima.de/aktuelles/fragen-aus-der-praxis/detail?tx_ttnews%5Btt_news%5D=1800&cHash=67c9e6bd7a36ecf2cde5a086e61735a4, 22.10.2024.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR, 2013a): Hydrogeologische Karten für den Hydrologischen Atlas von Deutschland - Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen (ERGW1000) als Shapefile. <https://download.bgr.de/bgr/grundwasser/ERGW1000/shp/ERGW1000.zip>, 02.10.2023.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR, 2013b): Hydrogeologische Karten für den Hydrologischen Atlas von Deutschland - Hydrogeologie (HY1000) als Shapefile. <https://download.bgr.de/bgr/grundwasser/HY1000/shp/HY1000.zip>, 02.10.2023.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR, 2019): Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:250.000 (GÜK250) als SHP-Datei. <https://download.bgr.de/bgr/Geologie/GUEK250-INSPIRE/gml/GUEK250-INSPIRE.zip>, 02.11.2023.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR, 2022): HÜK250 - Hydrogeologische Übersichtskarte von Deutschland 1:250.000 als SHP-Datei. 2.10.2023 von Website der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: <https://download.bgr.de/bgr/grundwasser/huek250/shp/huek250.zip>

BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (BKG, 2023): Kartendarstellung und Präsentationsgraphiken: TopPlusOpen Light - WMS Dienst. https://sg.geodatenzentrum.de/web_public/gdz/datenquellen/Datenquellen_TopPlusOpen.html, 24.11.2023.

BUNDESMINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, ENERGIE MOBILITÄT, INNOVATION UND TECHNOLOGIE (BMK, 2019): Entwicklung einer „Merit-Order“ bei Regenerationswärme für Erdsondenfelder in urbanen Wohngebieten. https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe-2020-25-ecoregeneration.pdf, 21.10.2024.

- BUDERUS (2023): Badheizkörper, Flachheizkörper, Vertikalheizkörper - Logatrend Heizkörper.
<https://api-de.apps.de101pro.osh.epz001.public.bosch.cloud/buderus/productsde.buderus.com/broschuere/n/buderus-broschuere-logatrend-de-032023.pdf>, 03.09.2024.
- BUNDESVERBAND GEOTHERMIE (BVG, 2020): BUNDESVERBAND GEOTHERMIE - Lexikon der Geothermie, Energiepfahl, <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/e/energiepfahl>, 19.09.2024
- BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE (BWP, 2024): Bundesverband Wärmepumpe - Wie funktioniert die Wärmepumpe?, <HTTPS://WWW.WAERMEPUMPE.DE/WAERMEPUMPE/FUNKTION-WAERMEQUELLEN/>, 3.9.2024
- CONSOLAR SOLARE ENERGIESYSTEME GMBH (2024) <HTTPS://WWW.CONSOLAR.DE/EN/SOLINK-HEAT-PUMP-COLLECTOR/>, 03.09.2024.
- COLD.WORLD GMBH (2017): ISO 817 Kältemittelklassifizierungsschema. https://cold.world/de/know-how/kaeltemittelklassifizierung_22.10.2024.
- ESO (2024): Erdwärmesondenregeneration: Abgerufen am 24.10.2024:
<https://www.erdsondenoptimierung.ch/index.php?id=269187>
- GEOPLASMA-CE (2019): GeoPLASMA-CE web-portal. <https://portal.geoplasma-ce.eu/webgis/vogtland-w-bohemia> 24.11.2023.
- HEIZPARER (2024): Strahlungs- und Konvektionswärme.
<https://www.heizparer.de/heizung/heizkorper/strahlungs-und-konvektionswaerme>, 23.10.2024.
- IFEU (2021): Energieeffizienz als Türöffner für erneuerbare Energien.
https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Publikationen/Biomasse/Landwirtschaft/_ifeu_2021__Energieeffizienz_als_T%C3%BCr%C3%B6ffner_f%C3%BCr_erneuerbare_Energien_im_Geb%C3%A4udebereich_Endbericht.pdf, 21.10.2024.
- LANDESAMT FÜR GEOBASISINFORMATION SACHSEN (GEO SN, 2023a): Flurstuecke und Gemarkungen - WMS Dienst. https://geodienste.sachsen.de/wms_geosn_flurstuecke/guest?, 24.11.2023.
- LANDESAMT FÜR GEOBASISINFORMATION SACHSEN (GEO SN, 2023b): SN DOP 020 - WMTS Dienst.
https://geodienste.sachsen.de/wmts_geosn_dop_rgb/guest?REQUEST=GetCapabilities&SERVICE=WMTS&VERSION=1.3.0, 24. 11 2023.
- LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (LFULG, 2020): Geothermieatlas Sachsen - WFS Dienst.
<https://geoportal.umwelt.sachsen.de/arcgis/services/geologie/gtk50/MapServer/WFSServer?>, 24.11.2023.
- LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (LFULG, 2023): Verfahrenshandbuch für oberflächennahe Erdwärmennutzung in Sachsen. Sächsisches Landesamt für Umwelt,

Landwirtschaft und Geologie,

<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/42073/documents/64247>, 24. 11 2023.

LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (LFULG, 2023a): Schutzgebiete in Sachsen - WFS Dienst. <https://luis.sachsen.de/arcgis/services/natur/schutzgebiete/MapServer/WFSServer> , 24.11.2023.

LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (LFULG, 2023b): Wasserschutzgebiete in Sachsen - WMS Dienst.
<https://geoportal.umwelt.sachsen.de/arcgis/services/wasser/wasserschutzgebiete/MapServer/WMServer?>, 24.11.2023.

OpenStreet Map (OSM, 2024) Map data - Tile Dienst, <http://tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png> , 03.09.2024.

SÄCHSISCHES OBERBERGAMT (OBA, 2023): Gebiete mit unterirdischen Hohlräumen gemäß §7 SächsHohlrvO - WMS Dienst. https://geodienste.sachsen.de/wms_oba_hohlraumkarte/guest, 24.11.2023.

SCHULZ, R., KNOPF, S., SUCHI, E., DITTMANN, J. (2013): Endbericht zum Projekt „Geothermieatlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie“. https://www.geotis.de/homepage/publications/maps/Geothermieatlas_PDF.zip, 24.11.2023.

SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ENERGIE, KLIMASCHUTZ, UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (SMEKUL, 2023): Der geologische Aufbau Sachsens im Überblick. <https://www.geologie.sachsen.de/ueberblick-28538.html>, 24.11.2023.

SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ENERGIE, KLIMASCHUTZ, UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (SMEKUL, 2024): iDA Portal.
<https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/infosysteme/ida/pages/map/default/index.xhtml>, 12.01.2024.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI, 2019): VDI 4640 Blatt 2 - Projekt - Thermische Nutzung des Untergrunds - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen., Erscheinungsort: Beuth Verlag GmbH.

A 1 Anhang

Tabelle A 1: Wärmeleitfähigkeiten der Schichten aus dem Projekt GeoPLASMA-CE

Nr	Name Schicht	Gesteinseinheit	WLF trocken	WLF gesättigt	HGE
1	anthropogenic fillings	Anthropogene Auffüllungen: Bergbauhalden, Abraum, Müll, Gesteinsmassen, Holozän	0,4	1,6	11100
2	organic sediments	Organogene Bildungen: Torf, Ton und Schluff, stark humos	0,3	1,2	11400
3	alluvial fine-clastic sediments	Bindige holozäne Talfüllungen: Auenlehm: alluvialer Ton, Schluff, Sand, Holozän	0,5	1,7	11320
4	alluvial coarse-clastic sediments	alluvialer Kies: Holozän// Auenkiese	0,4	1,8	11360
5	colluvial sediments	Gehängelehm: kolluvialer Lehm und Solifluktionssedimente	0,5	1,7	12210
6	lower Weichsel terrace	tiefe Niederterrasse Hochweichsel: Kies und Sand, Pleistozän	0,4	2,4	12500
9	Elster terrace	Mittlere Terrasse der Weißen Elster und ihrer Nebentäler: Kies und Sand, Pleistozän	0,4	1,8	10000
10	late Tertiary lower Pleistocene terrace	Jungtertiäre bis unterpleistozäne Terrassen: Sand und Kies	0,4	2,4	19150
15	contact metamorphic rocks	innerer Kontakthof, Hornblende-Hornfels und Pyroxen-Hornfels Fazies	2,1	2,4	97511
18	Bergen granite	Bergengranit: Granit, Karbon	3,3	3,3	10003
22	Devonian volcanic rocks	vulkanische Gesteine: Basalt, Rhyolith, Tuff verschiedener Korngrößen, Oberdevon	2,3	2,3	83110
23	Devonian clastic sediments	Schluffschiefer und Grauwacken // Tonschiefer und Schluffschiefer mit kalkigen Lagen, Tentakulitenkalkstein	2,8	2,8	97600 und 10015
25	Silurian sediments	Kiesel- und Alaunschiefer, Silur	1,7	1,9	96553
26	phyllite	Gruppe der Phyllite: Tonschiefer, Phyllit, untergeordnet Chloritschiefer	2,1	2,9	83330
27	quarzite	Hauptquarzit, quarzitischer Sandstein, Hauptquarzit	2,8	2,8	96604
28	quartzitic meta-sandstone	Quarzite und Sandsteine des Ordoviziums, Schluffschiefer, quarzitisches Sandsteine, Quarzitschiefer	2,6	2,8	10004
34	wrench and thrust unit	Schuppenzone: stark gestörte Melange paläozoischer Gesteine (Cadomische Magmatite, Metagranit bis Orthogneis)	1,9	2,1	24

A 2 Beispielquartier Rückert Campus

A 2.1 Anlagenschema Rückert Campus

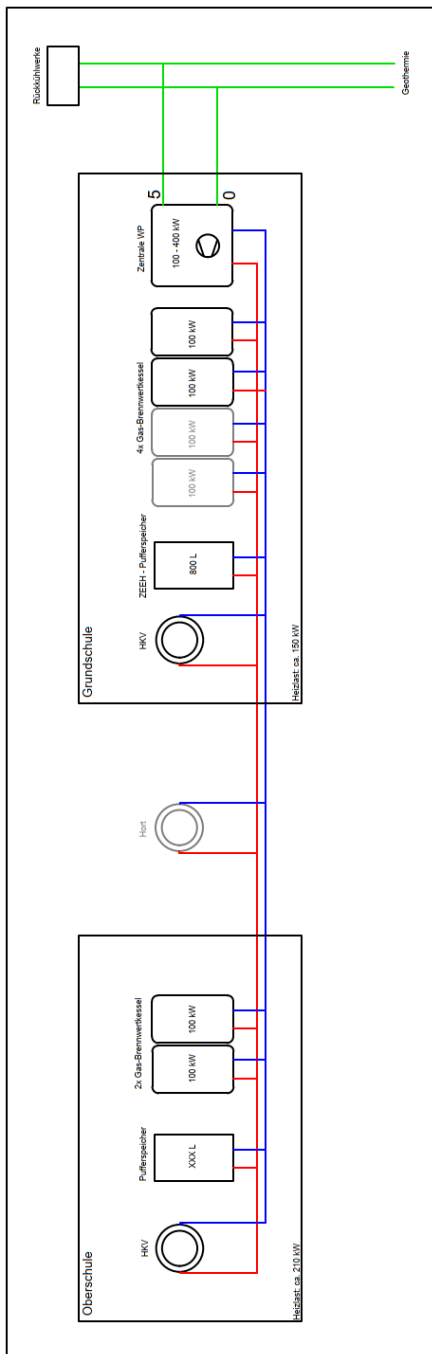


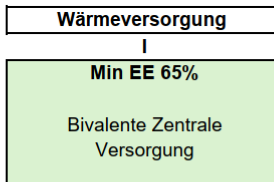
Abbildung A 1: Anlagenschema Rückert Campus

A.2.2 Wirtschaftlichkeitsberechnung Rückert Campus

Annahmen

* alle Preisangaben netto

Betrachtungszeitraum	20 a
Zinsen	6,5 %
Preisentwicklung Strom	2 %
Preisentwicklung Fernwärme	2 %
Preisentwicklung Gas	2 %
Preisentwicklung Instandhaltung/Wartung/Inspektion	2 %
Strom Mischpreis	0,24 €/kWh
Fernwärme Mischpreis	0,12 €/kWh
Gaspreis	0,12 €/kWh
EE-Anteil Fernwärme	0,30
Direktvermarktung Strom > 100 kWp	0,062 €/kWh



Versorgungsparameter

Heizlast aller Objekte (mit Gleichzeitigkeit)	387	kW
Verlustleistung Wärmenetz (mittl.)	1,3	kW
Wärmebedarf Heizung:	696.385	kWh/a
davon Oberschule	375.431	kWh/a
davon Grundschule	275.414	kWh/a
davon Hortgebäude	45.540	kWh/a
Wärmebedarf WWB (nur Grundschule)	48.955	kWh/a
Wärmeverlust Trasse	7.319	kWh/a
Wärmebedarf Gesamtes Quartier*	752.658	kWh/a

*Wärmeverluste für die Erzeugersimulation vernachlässigt

Wärmeerzeuger I: Wärmepumpe

Wärmepumpen Zentral	525.998	kWh/a
Genutzte Umweltwärme Sonden	374.430	kWh/a
Jahresarbeitszahl Wärmepumpen*	3,47	
Benötigte Regeneration Sonden (50 %)	187.215	kWh/a

*Gesamtsystem ohne Trassenverluste

Wärmeerzeuger II: Gaskessel

Gaskessel	219.342	kWh/a
Anteil an Gesamtwärmemenge	0,29	
Effizienz Gaskessel	0,9	

Strombedarfe

Wärmepumpen Zentral	151.568	kWh/a
Netzpumpen (4% d. Wärmemenge)	16.839	kWh/a
Solepumpen (3% d. Wärmemenge)	11.233	kWh/a
Rückkühler	10.789	kWh/a
Strombedarf Summe	190.428	kWh/a

PV-Anlage

Erzeugung	56.883	kWh/a
Eigenbedarfsdeckung	32.783	kWh/a
Netzeinspeisung	24.100	kWh/a

Installierte Systeme

Gesamte Installierte Wärmeleistung (6x Gaskessel)	600	kW
ZEEH-Speicher	0,8	m ³

Zu installierende Systeme

Gesamte Installierte Wärmeleistung (ca.)	500	kW
Leistung Wärmepumpen (zentral)	100	kW
Leistung Gaskessel (Bestand: 4 Stk.)	400	kW
Rückkühlwerke (100% Regeneration)	385	kW
Speicher zentral Summe	3,0	m ³
Anzahl Sonden mit 200 m Teufe*	20	Stk.
Benötigte Fläche für Sondenbohrungen	980	m ²
Trassenmeter Wärmenetz	85	m
Photovoltaik-Anlage (gesamter Campus)	70	kWp

Investitionskosten

Sole-Wärmepumpen (zentral)	70.000	€
Pufferspeicher	5.000	€
WP-Erzeuger-Hydraulik	10.000	€
WP-Quelle-Hydraulik	225.000	€
HK-Verteiler, inkl. RLB	5.000	€
Elektroinstallation Peripherie Hausanschluss	20.000	€
Geothermie-Sonden exkl. Anbindung	584.000	€
Druckhaltung	5.000	€
Monitoring / Messkonzept / Regelung	30.000	€
Photovoltaikanlage	105.000	€
Wandlermessung (PV + WP)	20.000	€
Rückkühler + hydr. Einbindung	50.000	€
Wärmetrasse	50.000	€
Tiefbau	10.000	€
Summe	1.179.000	€

Jährliche Kosten

Netzbezug Strom	37.835	€/a
Einspeisevergütung	1.494	€/a
Gas	29.246	€/a
Betriebsgebundene Kosten Sondenfeld (0,3%)	1.752	€/a
Betriebsgebundene Kosten Erzeuger (2,5%)	4.250	€/a
Betriebsgebundene Kosten PV-Anlage (0,5%)	525	€/a
Summe Betriebskosten (netto)	75.102	€/a

Wirtschaftlichkeit

Gesamtkosten über 20 Jahre	2.330.704	€
Wärmegestehungskosten **	15,5	ct/kWh (netto)

** ohne Ertüchtigung Gebäude / im Betrachtungszeitraum

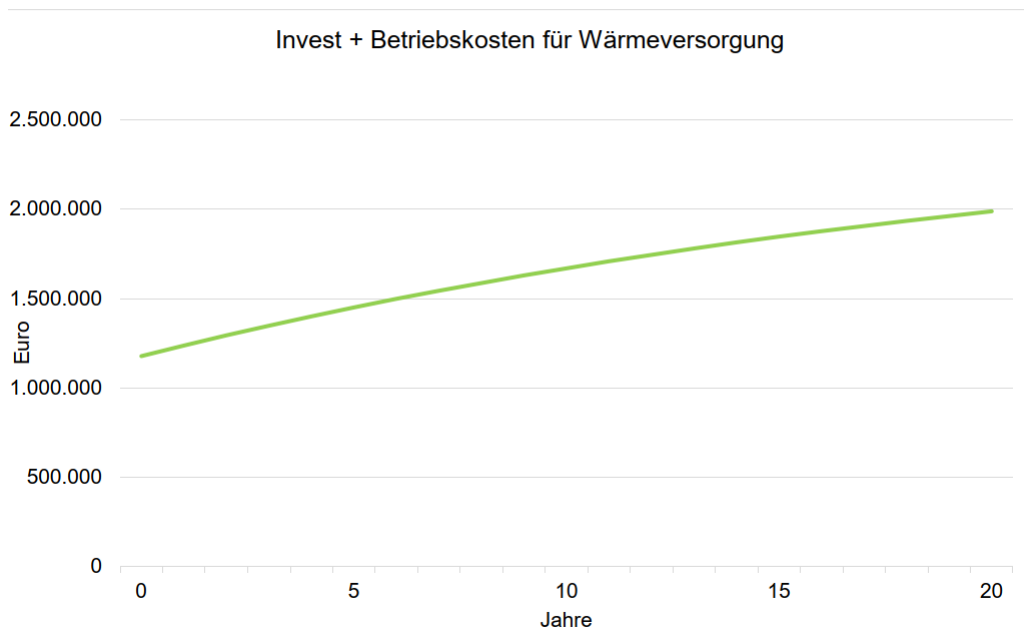


Abbildung A 2: Wirtschaftlichkeitsberechnung Rückert Campus

A 3 Beispielquartier Bahnhofsvorstadt

A 3.1 Quartierssteckbrief Bahnhofsvorstadt

		Ost	West	Süd	Gesamt
Wärmeerzeugung und Heizungschnik	Anteile FW-Versorgung [%]	95%	57%	48%	70%
	durchschnittl. HZ-Vorlaufemperatur [°C]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	Abschätzung Niedertemperaturtauglichkeit (Typ 1/2) anteilig Energiebezugsfläche	81%	62%	90%	77%
	Anteil Heizlast gedeckt durch 1-Rohr-HZ	35%	5%	0%	12%
	Heizlast [kW] (Einzelgebäude)	1.460	2.320	1.190	4.970
	p. Heizlast [kW]	1.410	2.110	1.180	4.700
	p. Heizlast [kW] (inkl. Gleichzeitigkeit)	1.000	1.660	830	3.490
	spezif. Heizlast [W/m ²]	38	72	47	56
p. spezif. Heizlast [W/m ²] (inkl. GLZ)	26	51	33	36	
Heizwärmebedarf	Heizwärmebedarf [kWh/a]	2.270	2.800	1.470	6.540
	p. Heizwärmebedarf [kWh/a]	2.200	2.600	1.400	6.200
	spezif. Heizwärmebedarf [kWh/(m ² a)]	59	87	58	68
	p. spezif. Heizwärmebedarf [kWh/(m ² a)]	57	80	56	64
	Anteil Wärmebedarf ermittelt auf Basis von Verbrauchswerten [%]	95%	62%	47%	70%
	Kältebedarf [kWh/a]	-	-	-	-
WWB	prozentualer Anteil zentrale WWB	22%	2%	11%	12%
	p. prozentualer Anteil zentrale WWB	32%	19%	29%	21%
Gesamt-Wärme	Gesamtwärmebedarf [MWh/a]	2.910	2.870	1.650	7.430
	p. Gesamtwärmebedarf [MWh/a]	2.900	3.100	1.800	7.800
Gebäude	Baujahr	ca. 1970-80			
	Sanierungs Zustand	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	Energiebezugsfläche [m ²]	38.719	32.317	25.175	96.211
	Quartiersfläche [m ²]	54.775	37.111	49.206	141.092
	Energiebeugsdichte [m ² /m ²]	0,71	0,87	0,51	0,68
Clusterung	Nutzungsart [G/W/Ö]	Anteile am Heizwärmebedarf			
	W	86%	56%	80%	72%
	G	14%	4%	20%	11%
	Ö	0%	40%	0%	17%
räumliches Potenzial	für Wärmeversorgungsstrassen	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	für Energiezentralen	k.A.	Tischend Karlstr.	k.A.	k.A.

		Ost	West	Süd	Gesamt
Potenziale aus Umwelt und Abwärme	Bedarf Umweltwärme [MWh] (bei 100% EE, JAZ =4)	1650	1950	1050	4650
	Geothermie				
	pot. Bohrpunkte	115	227	251	593
	Erst-Abschätzung geotherm. Ertrag [MWh] (200m, 50% Reg)	1.150	2.270	2.510	5.930
	Differenz zu Bedarf (100% EE)	-500	320	1.480	1.280
	Luftwärme				
	Anzahl Rückkühler	15	31	10	56
	Luftwärme [MWh/a]	10.700	22.100	7.100	40.000
	Differenz zu Bedarf (100% EE)	9.050	20.150	6.050	35.350
	Photovoltaik				
pot. Modulfläche [m ²]	600	1130	250	1980	
photovoltaischer Ertrag [MWh/a]	133	251	56	440	
Abwärme					
Wärmemenge [MWh/a]	-	-	-	-	

Abbildung A 3: Quartierssteckbrief Bahnhofsvorstadt

A 3.2 Wirtschaftlichkeitsberechnung Bahnhofsvorstadt

Variantenvergleich Wärmeversorgung	
Variante 1 o.F.	Variante 1 m.F.
Min. EE 75%	Min. EE 75%
NT-Netz	NT-Netz inkl. BEW- Förderung

Versorgungsparameter

Heizlast aller Objekte (mit Gleichzeitigkeit)	kW	3.500	"="
Verlustleistung Wärmenetz (mittl.)	kW	36	"="
Wärmegewinn Wärmenetz (mittl.)	kW	-	"="
Wärmebedarf Heizung	MWh/a	6.078	"="
Wärmebedarf WWB	MWh/a	1.543	"="
Wärmeverlust Netz	MWh/a	473	"="
Wärmegewinn Netz	MWh/a	-	"="

Wärmebedarf Gesamtes Quartier	MWh/a	8.094	"="
--------------------------------------	--------------	--------------	------------

Wärmeerzeuger I: Wärmepumpe

Wärmepumpen Zentral	MWh/a	5.060	"="
Wärmepumpen dezentral (Heizung)	MWh/a	-	"="
Wärmepumpen dezentral (WWB)	MWh/a	-	"="
Genutzte Umweltwärme Sonden	MWh/a	4.029	"="
Genutzte Umweltwärme Wärmenetz	MWh/a	-	"="
Jahresarbeitszahl Wärmepumpen* ¹		4,91	"="
Jahresarbeitszahl Wärmepumpen (mit Heizstab)*		-	"="
Benötigte Regeneration Sonden	MWh/a	2.014	"="

*Gesamtsystem mit zentralen und dezentralen Wärmepumpen

Wärmeerzeuger II: Fernwärme / Heizstab

Fernwärme	MWh/a	2.753	"="
Anteil an Gesamtwärmemenge		34,0%	"="
E-Kessel	MWh/a	-	"="
Anteil an Gesamtwärmemenge		-	"="

Strombedarfe

Wärmepumpen Zentral	MWh/a	1.031	"="
Wärmepumpen dezentral (Heizung)	MWh/a	-	"="
Wärmepumpen dezentral (WWB)	MWh/a	281	"="
E-Kessel	MWh/a	-	"="
Netzpumpen (4% d. Wärmemenge)	MWh/a	313	"="
Solepumpen (3% d. Wärmemenge)	MWh/a	121	"="
Rückkühler (3% d. Wärmemenge)	MWh/a	60	"="
Strombedarf Summe	MWh/a	1.746	"="

Zu installierende Systeme

Gesamte Installierte Wärmeleistung* ²	kW	3.800	"="
Benötigte Leistung Wärmepumpen (zentral)	kW	1.200	"="
Benötigte Leistung Wärmepumpen (dezentral)	kW	-	"="
Benötigte Leistung Fernwärme	kW	2.600	"="
Benötigte Leistung E-Kessel	kW	-	"="
Rückkühlwerke (50% Regeneration)	kW	1.500	"="
Speicher zentral Summe	m ³	22	"="
Speicher dezentral Summe	m ³	48	"="
Anzahl Sonden mit 300 m Teufe	Stk.	373	"="
Benötigte Fläche für Sondenbohrungen	m ²	59.200	"="
Trassenmeter Wärmenetz	m	2.800	"="

*² wird z.T. redundant installiert

Variantenvergleich Wärmeversorgung	
I	I-F
Min. EE 75%	Min. EE 75%
NT-Netz	NT-Netz inkl. BEW- Förderung

Investitionskosten (netto) € **19.033.000** **11.631.000**

Energiezentralen (inkl. Baukörper) € **F** **4.251.000** **2.750.000**

Sole-Wärmepumpen (zentral)	€	40%	720.000	432.000
Pufferspeicher	€	40%	40.000	24.000
WP-Erzeuger-Hydraulik	€	40%	160.000	96.000
WP-Quelle-Hydraulik	€	40%	160.000	96.000
HK-Verteiler, inkl. RLB	€	40%	400.000	240.000
HK-Pumpen, inkl. RLB	€	40%	570.000	342.000
Druckhaltung + Nachspeisung	€	40%	304.000	182.000
Regelung	€	40%	304.000	182.000
Monitoring	€	40%	266.000	160.000
Messkonzept	€	40%	152.000	91.000
Anschluss Fernwärme (psch.)	€	0%	100.000	100.000
Rückkühler + Einbindung	€	40%	675.000	405.000
Baukörper	€	0%	400.000	400.000

Dezentrale Erzeugung € **F** **318.000** **318.000**

Wasser-Wärmepumpen (dezentral)	€	0%	150.000	150.000
Pufferspeicher	€	0%	62.000	62.000
Hydraulik	€	0%	74.000	74.000
Elektro- / MSR-Technik	€	0%	32.000	32.000

Wärmenetz € **F** **2.532.000** **1.518.000**

Tiefbau* ³	€	40%	550.000	330.000
Rohrleitung* ⁴	€	40%	1.752.000	1.051.000
Leckageüberwachung	€	40%	39.000	23.000
Wärmeträger (Sole bzw. Wasser)	€	40%	129.000	77.000
MSR-Technik	€	40%	62.000	37.000

Geothermie € **F** **10.202.000** **6.180.000**

Herstellung Erdwärmesonden	€	40%	7.698.807	4.619.000
Leitungsanbindung EWS inkl. Tiefbau	€	40%	1.271.020	763.000
Solehauptleitungen, inkl. Tiefbau	€	40%	748.000	449.000
Systembefüllung und hydraulische Regulierung	€	40%	299.695	180.000
Dokumentation	€	40%	37.400	22.000
Verschuldensunabhängige Versicherung	€	0%	147.015	147.000

Planungskosten (10%) € **F** **50%** **1.730.000** **865.000**

*³ ohne Rückbau Trasse und Haubekanal im Bestand / ohne Straßenbau

*⁴ ohne Nutzung Bestandsnetz

Jährliche Kosten

Betriebskosten (netto) €/a **957.500** **808.200**

Netzbezug Strom* ⁵	€/a	418.900	269.600
Fernwärme	€/a	330.400	330.400
Betriebsgebundene Kosten Wärmenetz (2,5%)	€/a	63.300	63.300
Betriebsgebundene Kosten Sondenfeld (0,3%)	€/a	30.600	30.600
Betriebsgebundene Kosten Energiezentrale (2,5%)	€/a	106.300	106.300
Betriebsgebundene Kosten Dezentrale Erzeuger (2,5%)	€/a	8.000	8000

Wirtschaftlichkeit

Gesamtkosten über 20 Jahre € **32.400.000** **23.506.000**

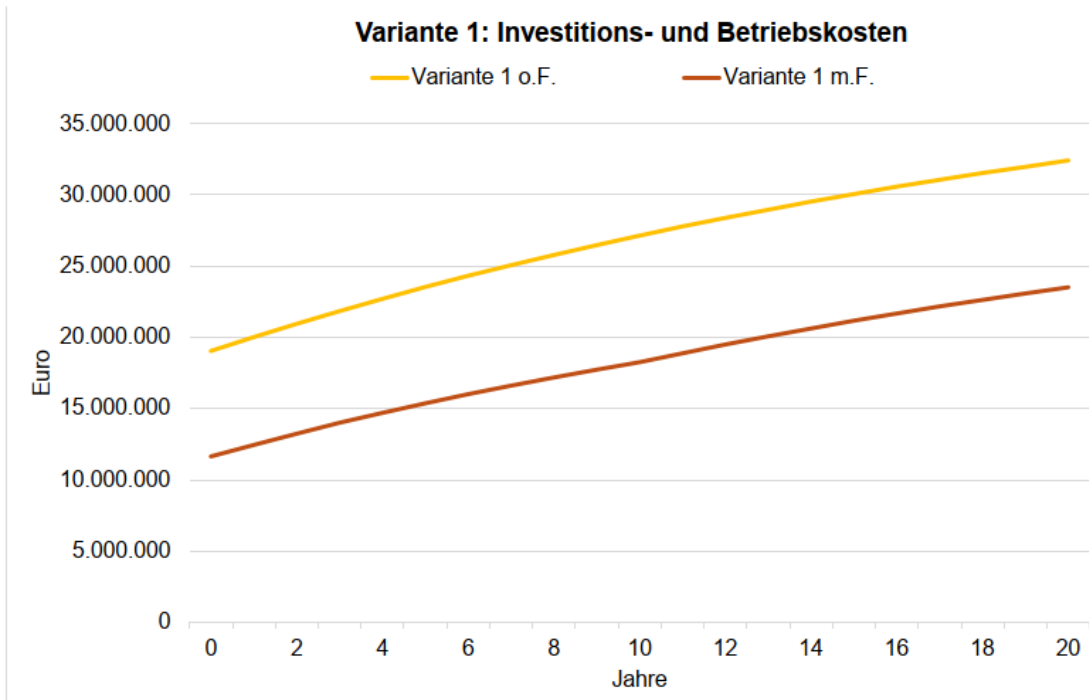
Erneuerbarer Anteil Wärmenetz *⁶ 75,3% 75,3%

Wärmegestehungskosten *⁷ ct/kWh (netto) 21,3 15,4
ct/kWh (brutto)

*⁵ Strokosten bezüglich der ersten 10 Jahre (bei Förderung)

*⁶ Bilanz nach BAFA

*⁷ ohne Kosten zur Ertüchtigung Gebäude / im Betrachtungszeitraum



Annahmen

Betrachtungszeitraum	20 a
Zinsen	6,5 %
Preisentwicklung Strom	2 %
Preisentwicklung Fernwärme	2 %
Preisentwicklung Instandhaltung/Wartung/Inspektion	2 %
Strom Mischpreis	0,24 €/kWh
Fernwärme Mischpreis	0,12 €/kWh
EE-Anteil Fernwärme	0,30

* alle Preisangaben netto

Abbildung A 4: Wirtschaftlichkeitsberechnung Bahnhofvorstadt

A 4 Beispielquartier Oberlosa

A 4.1 Annahmen

Tabelle A 2: Annahmen Oberlosa

Annahmen		1	2a	2b	Quelle		
0	Status	unbebaut	bebaut	unbebaut			
1	Gesamtfläche [m ²]	286.686	329.714	309.230	Flächennutzungsplan		
2	Anteil vermarktbarer Grundstücksfläche [m ²]	194.000	283.600	246.500	Stadt Plauen		
3	Anteil bebauter Flächen [m ²]	30%	58.200	85.080	73.950	Annahme	
4	Anteil Nutzung	[m ²]	[m ²]	[m ²]	Stadt Plauen		
	Produktion	60%	34.920	51.048	44.370	Annahme/Bebauungsplan	
	Logistik	20%	11.640	17.016	14.790		
	Büro	20%	11.640	17.016	14.790		
5	Bruttogeschossfläche	Geschossigkeit	[m ²]	[m ²]	[m ²]	Annahme/Bebauungsplan	
	Produktion	1,0	34.920	51.048	44.370		
	Logistik	1,0	11.640	17.016	14.790		
	Büro	2,5	29.100	42.540	36.975		
6	Heizlast	spezif. Heizlast [W/m ²]	[kW]	[kW]	[kW]	Annahme	
	Produktion	45	1.571	2.297	1.997	Annahme	
	Logistik	45	524	766	666		
	Büro	35	1.019	1.489	1.294		
7	Heizwärmebedarf	spezif. Heizw.-Bedarf [kWh/(m ² a)]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	Annahme	
	Produktion	70	2.444	3.573	3.106	Annahme	
	Logistik	50	582	851	740		
	Büro	60	1.746	2.552	2.219		
8	Vollbenutzungsstunden	Stunden [h]	[h]	[h]	[h]	Berechnung / Simulation	
	Produktion	50	1.556	1.556	1.556	Berechnung / Simulation	
	Logistik	45	1.111	1.111	1.111		
	Büro	40	1.714	1.714	1.714		
9	Kühllast	spezif. Kühllast [W/m ²]	Flächenanteil [kW]	[kW]	[kW]	Annahme	
	Produktion	24	0,10	84	122	106	Annahme
	Logistik	60	0,18	122	179	155	
	Büro	60	0,70	1.222	1.787	1.553	
10	Kühlbedarf	anteilig an Heizw.-Bedarf [%]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	Annahme	
	Produktion	30%	733	1.072	932	Annahme	
	Logistik	10%	58	85	74		
	Büro	40%	698	1.021	887		

A 4.2 Berechnungs-Ergebnisse

Tabelle A 3: Berechnungs-Ergebnisse Oberlosa

Berechnungs-Ergebnisse		1	2a	2b	Quelle
12	Reg.-Anteil Kälte an Gesamtenzugsmenge	anteilig an Wärmeentzug[%]			Berechnung / Simulation
	Produktion	19%	19%	19%	Berechnung / Simulation
	Logistik	39%	2%	1%	
	Büro	18%	18%	18%	
13	Zusammenfassung				Berechnung / Simulation
	Heizlast [kW]	3.114	4.552	3.956	Berechnung / Simulation
	Heizwärmebedarf [MWh]	4.772	6.977	6.064	
	Kühllast [kW]	1.428	2.088	1.815	
	Kühlbedarf [MWh]	1.490	2.178	1.893	

HeatMap

Legende

Freiflächen

Gesamt- Kühl- und Heizwärmebedarf [MWh/a]

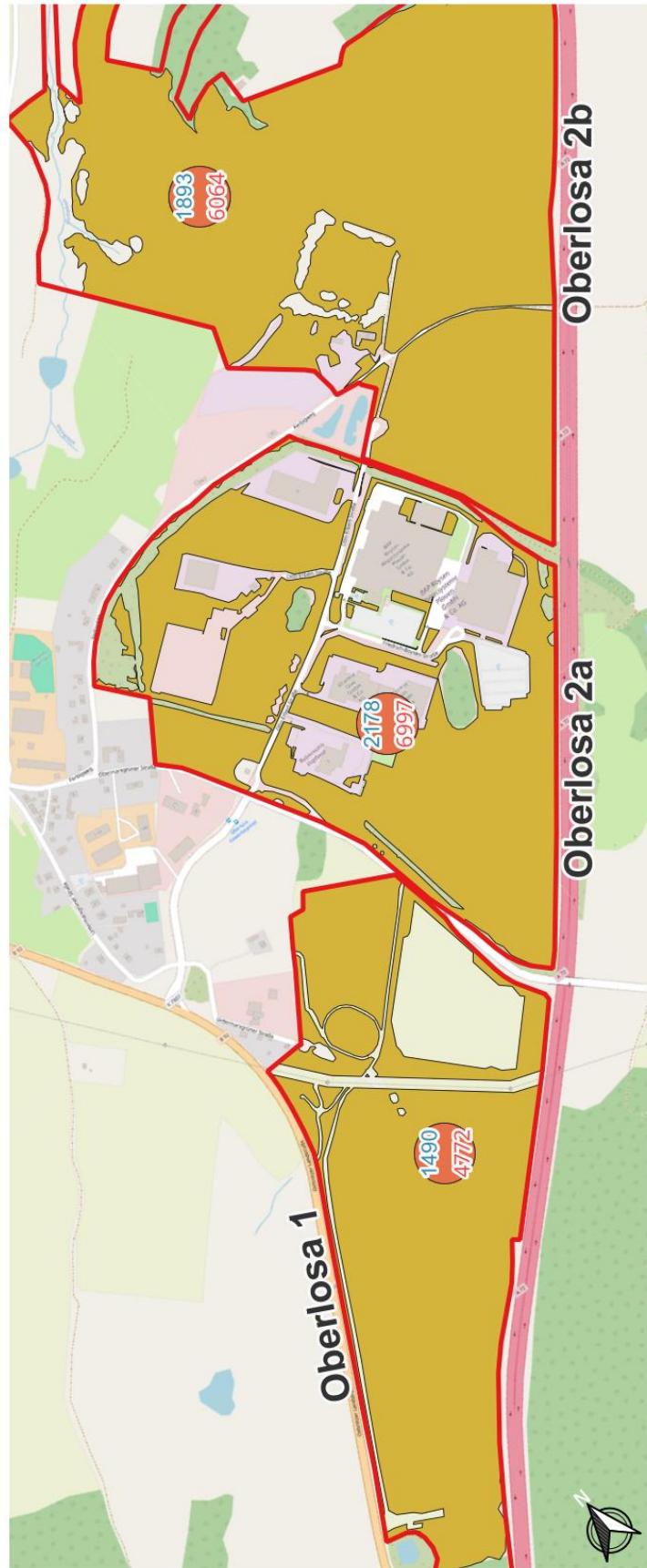


Abbildung A 5: HeatMap Oberlosa, mit Freiflächen zur Positionierung von EWS, Rückkühler, PV-Anlagen (Quelle: OSM 2024, Map data © OpenStreetMap contributors)

A 4.4 Oberlosa: Ergebniskarte geothermische und technische Dimensionierung

**Ergebnisse Dimensionierung
Kaltnetz, EWS-Felder und Rückkühler**

Legende

EWS-Felder

Rückkühler

Kaltnetz (Querschnittsangaben in mm)

Gesamt- Kühl- und Heizwärmebedarf [MWh/a]

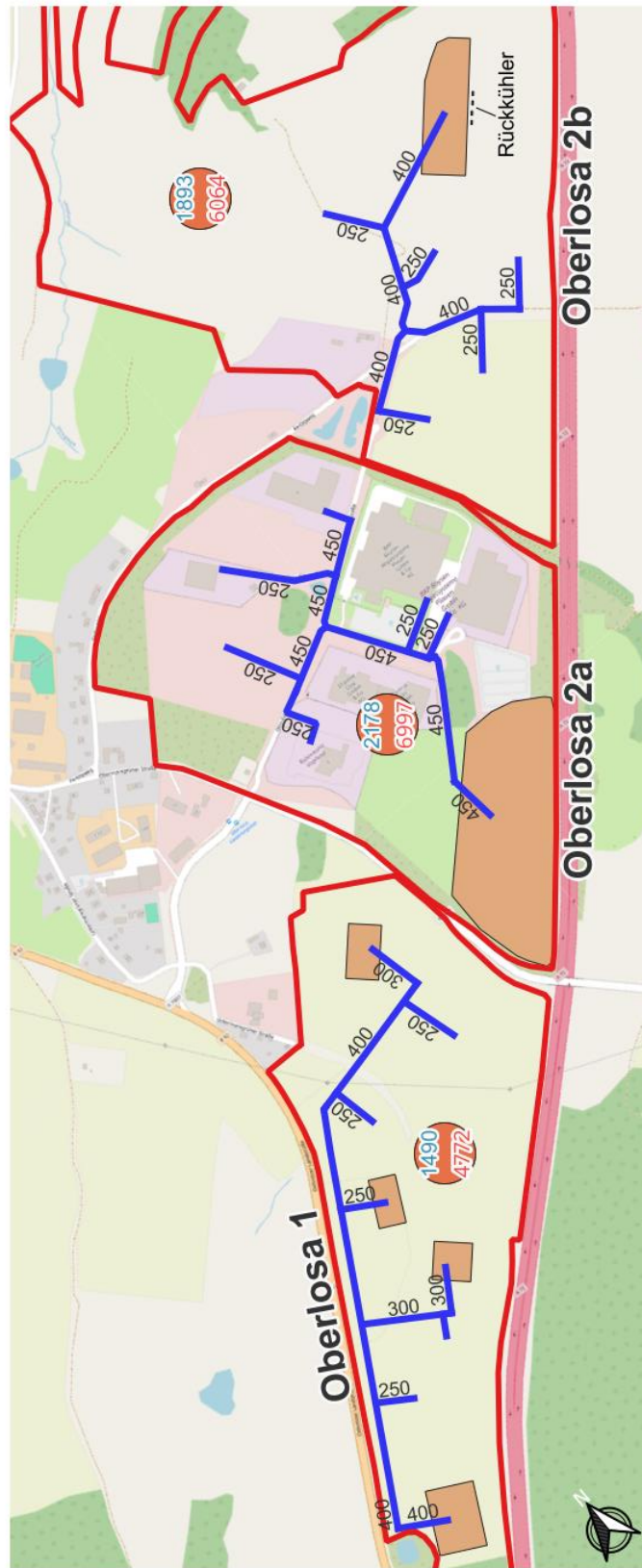


Abbildung A 6: Oberlosa: Ergebniskarte geothermische und technische Dimensionierung (Quelle: OSM 2024, Map data © OpenStreetMap contributors)

A 4.5 Oberlosa Wirtschaftlichkeitsberechnung

alle Preisangaben in netto

Variantenvergleich	
Variante III o. F.	Variante III m. F.
Max. EE 100%	Max. EE 100%
Kaltes Netz	Kaltes Netz inkl. BEW- Förderung

Heiz- Kühlbedarf Gesamtes Quartier (Nutzenergie)	MWh/a	23.371	23.371
Wärmebedarf Heizung	MWh/a	17.813	"="
Wärmebedarf WWB	MWh/a	0	"="
Wärmeverlust Netz	MWh/a	0	"="
Wärmegewinn Netz	MWh/a	0	"="
Kühlbedarf	MWh/a	5.558	"="

Heiz- Kühlbezug aus Kalt-Netz (Endenergie)	MWh/a	19.758	19.758
Annahme JAZ (Heizen)		5,0	"="
Heizwärmebedarf	MWh/a	14.200	"="
Kühlbedarf (bei 100% freie Kühlung)	MWh/a	5.558	"="
Regenerationswärmebedarf (Rückkühler)	MWh/a	2.908	"="

Strombedarf	MWh/a	419	419
Solepumpen	MWh/a	332	"="
Rückkühler (3% d. Wärmemenge)	MWh/a	87	"="

Zu installierende Systeme

Wärmenetz			
Trassenmeter Wärmenetz	m	4.260	"="
Sole Wärmenetz	m³	680	"="
Tiefbau Wärmenetz	m³	14.861	"="
Pumpstation			
Pumpen	kW	100	"="
Hochbau	m²	675	"="
Geothermie			
Anzahl Sonden mit 250 m Teufe	Stk.	220	"="
Anzahl Sonden mit 400 m Teufe	Stk.	1.088	"="
Rückkühlwerke (50% Regeneration)			
Rückkühler	MW	2,1	"="

Investitionskosten	F	€	66.214.000	39.724.000
Wärmenetz				
Rohrleitung	40%	€	5.444.000	3.266.000
Sole Wärmenetz	40%	€	2.255.000	1.353.000
Tiefbau Wärmenetz	40%	€	469.000	281.000
Tiefbau Wärmenetz	40%	€	2.675.000	1.605.000
Leckageüberwachung	40%	€	45.000	27.000
Pump- und Regelstation				
Pumpen	40%	€	2.665.000	2.085.000
Pumpen	40%	€	967.000	580.000
Rohrleitungsbau	40%	€	290.000	174.000
EMSR	40%	€	193.000	116.000
Hochbau	0%	€	1.215.000	1.215.000
Geothermie				
Sonden mit 250 m Teufe*	40%	€	52.784.000	31.670.000
Sonden mit 400 m Teufe*	40%	€	46.834.000	28.100.000
Sonden mit 400 m Teufe*	40%	€	5.950.000	3.570.000
Rückkühlwerke inkl. Anbindeleitungen				
Rückkühler	40%	€	416.000	250.000
Rückkühler	40%	€	320.000	192.000
Anbindeleitungen	40%	€	96.000	58.000
Planungskosten (8%)				
	50%	€	4.905.000	2.453.000

Jährliche Kosten	€/a	472.000	472.000
Netzbezug Strom	€/a	101.000	101.000
Betriebsgebundene Kosten Wärmenetz (2,5%)	€/a	136.000	136.000
Betriebsgebundene Kosten Pumpstation (2,5%)	€/a	67.000	67.000
Betriebsgebundene Kosten Geothermie (0,3%)	€/a	158.000	158.000
Betriebsgebundene Kosten Rückkühlwerke (2,5%)	€/a	10.000	10.000

Wirtschaftlichkeit

Gesamtkosten über 20 Jahre	€	72.797.000	46.307.000
Erneuerbarer Anteil Wärmenetz **		100%	100%
Wärmegestehungskosten *	ct/kWh	18,4	11,7

** Bilanz nach BAFA

* alle Preisangaben in netto

Annahmen

Betrachtungszeitraum	20 a
Zinsen	6,5 %
Preisentwicklung Strom	2 %
Preisentwicklung Instandhaltung/Wartung/Inspektion	2 %
Strom Mischpreis	0,24 €/kWh

* alle Preisangaben in netto

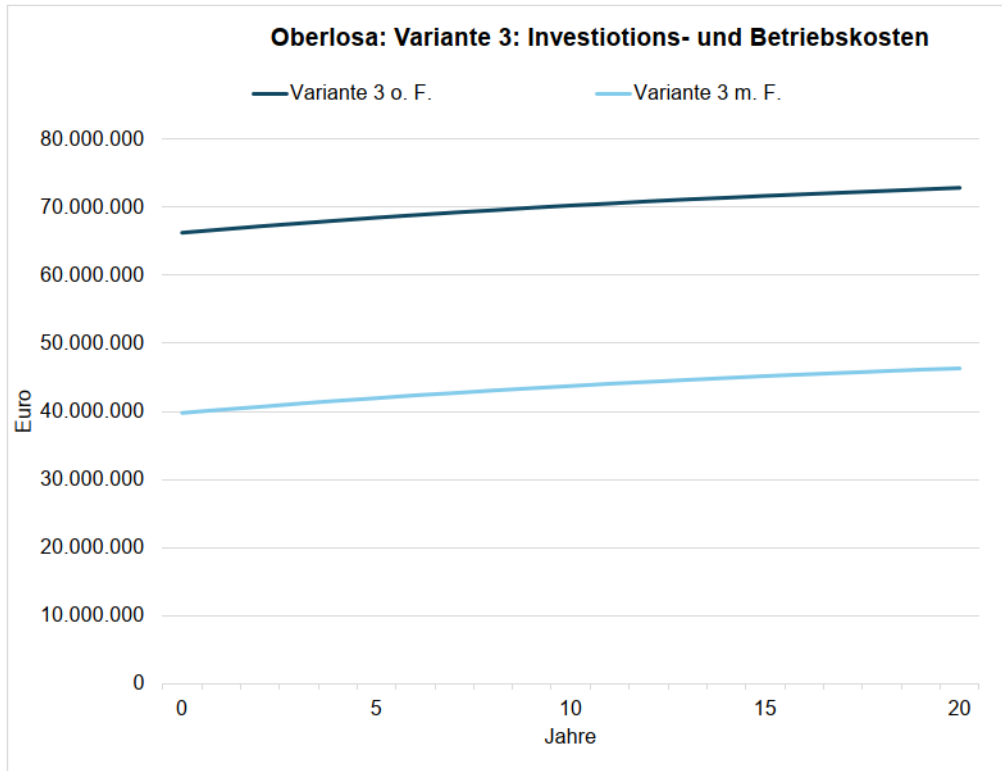


Abbildung A 7: Wirtschaftlichkeitsberechnung Oberlosa

Herausgeber

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0; Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: Poststelle@lfulg.sachsen.de
www.lfulg.sachsen.de

Autor

Konstanze Zschoke, Petr Novak, Anne Rannefeld, Anna Uhlig,
Tom Reinhardt
geoENERGIE Konzept GmbH
Sebastian Schwiedersky, Mathias Pannwitz, Gabriel Scherf, Georg Püschel
Integral Projekt GmbH & Co. KG

Redaktion

Karina Hofmann
LfULG Abteilung Geologie, Referat Rohstoffgeologie
Halsbrücker Str. 31a, 09599 Freiberg
Telefon: +49 3731 294 1409; Telefax: +49 3731 294 1099
E-Mail: karina.hofmann@lfulg.sachsen.de

Fotos

Autorengemeinschaft und LfULG (2024)

Redaktionsschluss

02.04.2026

Bestellservice

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei heruntergeladen werden aus der Publikationsdatenbank des Freistaates Sachsen (<https://publikationen.sachsen.de>).

Hinweis

Dieser Abschlussbericht wird vom LfULG (Geschäftsbereich des SMUL) kostenlos herausgegeben. Er ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

Täglich für ein gutes Leben.

www.lfulg.sachsen.de