



INNOVATIONSREGION
MITTELDEUTSCHLAND



Innovative Wärmeversorgung aus Tagebaurestseen

Schlussbericht

NEUE WEGE FÜR INNOVATION UND WERTSCHÖPFUNG

Strukturwandel in der Innovationsregion Mitteldeutschland

04.08.2021

Ein Projekt der



METROPOLREGION
MITTELDEUTSCHLAND

7 Landkreise und 2 Städte in 3 Bundesländern mit 2 Mio. Einwohnern



Impulse für Innovation und Wertschöpfung im Mitteldeutschen Revier

Im Strukturwandelprojekt „Innovationsregion Mitteldeutschland“ entwickelt die Europäische Metropolregion Mitteldeutschland (EMMD) gemeinsam mit den Landkreisen Altenburger Land, Anhalt-Bitterfeld, Burgenlandkreis, Leipzig, Mansfeld-Südharz, Nordsachsen und Saalekreis und den Städten Halle und Leipzig neue Strategien und Projekte für Innovation und Wertschöpfung, um den Strukturwandel in der Region aktiv zu gestalten.

Gefördert aus Mitteln der Bundesrepublik Deutschland, des Freistaates Sachsen, des Landes Sachsen-Anhalt und des Freistaates Thüringen im Rahmen der Gemeinschaftsaufgabe: "Verbesserung der regionalen Wirtschaftsinfrastruktur".

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses

STAATSMINISTERIUM
FÜR WIRTSCHAFT
ARBEIT UND VERKEHR





INNOVATIONSREGION
MITTELDEUTSCHLAND



Bearbeitung: Projektgruppe Seethermie



JENA-GEOS®-Ingenieurbüro GmbH | Tilia GmbH | Institut für Wasser und Boden
Dr. Uhlmann (IWB) | Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH (ILK) | Energieberatung
Bernd Felgentreff | Brandenburgische Technische Universität Cottbus – Senftenberg

Projektkoordination: JENA-GEOS®-Ingenieurbüro GmbH

Autoren: Stefan Böttger, Bernd Felgentreff, Dr. Gerold Hesse,
Martin-Joseph Hloucal, Dr. Dieter Leßmann, Sebastian Mix,
Dr. Kersten Roselt, Dr. Mathias Safarik, Jörg Schmidt, Christoph
Steffan, Dr. Wilfried Uhlmann

Redaktion: Dr. Kersten Roselt / Dr. Mathias Safarik / Dr. Wilfried Uhlmann
Jena, Dresden, Cottbus, Leipzig, 21.07.2021

Dateiversion: 20210723_Schlussbericht Seethermie V1.1

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-------------|
| Inhaltsverzeichnis | V |
| Abbildungsverzeichnis | VIII |
| Tabellenverzeichnis | XII |
| Abkürzungsverzeichnis | XIII |
| Zusammenfassung | 1 |
| 1 Motivation | 3 |
| 2 State of the Art | 5 |
| 2.1 Begriff Seethermie..... | 5 |
| 2.2 Technologie..... | 6 |
| 2.2.1 Wärmeentzug aus dem Gewässer | 6 |
| 2.2.2 Wärmetransformation/Wärmepumpe | 14 |
| 2.2.3 Wärmeverteilung/-Wärmenutzung: Neuartige Wärmenetze zur Nutzung bisher brachliegender Potenziale..... | 17 |
| 2.3 Ökologie..... | 18 |
| 2.4 Forschungsergebnisse & -bedarf | 21 |
| 2.4.1 Entnahme- und Abgabetiefe | 21 |
| 2.4.2 Forschungsbedarf | 23 |
| 2.5 Beispielprojekte..... | 24 |
| 2.5.1 Rathaus Zürich..... | 24 |
| 2.5.2 Campingplatz Laacher See..... | 25 |
| 2.5.3 Spital Männedorf am Züricher See..... | 25 |
| 2.5.4 Circulago am Zugersee..... | 26 |
| 2.5.5 Wärmepumpenanlage Walche ETH Zürich..... | 28 |
| 2.6 Fazit | 30 |
| 3 Quartiersansatz | 33 |
| 3.1 Das Quartier als optimale energetische Versorgungseinheit..... | 33 |
| 3.2 Der exemplarische Standort: das Quartier ‚Neue Harth‘ | 33 |
| 3.3 Quartiersumgebung..... | 36 |
| 3.4 Wärmebedarf | 37 |
| 4 Datengewinnung | 41 |
| 4.1 Recherche und Auswertung vorliegender Daten zur Gewässermorphologie, Wasserwirtschaft und Gewässerchemie..... | 41 |
| 4.2 Festlegung repräsentativer Messstellen und Konzeption eines Messprogramms | 46 |
| 4.3 Planung und Genehmigungsverfahren der Messstellen | 48 |
| 4.4 Errichtung der Messstellen | 49 |
| 4.5 Monatliche manuelle Tiefenprofilmessung | 51 |
| 4.6 Betrieb der automatischen Messstellen | 53 |

| | |
|---|-----------|
| 4.7 Ergebnisse der Messdatenerfassung | 54 |
| 4.8 Schlussfolgerungen für die Planung der Seethermie-Anlage | 54 |
| 5 Limnologie..... | 55 |
| 5.1 Gewässerökologische Grundlagen | 55 |
| 5.1.1 Bedeutung der Temperatur für das Durchmischungsverhalten | 55 |
| 5.1.2 Sauerstoffhaushalt von Seen | 56 |
| 5.1.3 Nährstoffe und Trophie | 57 |
| 5.2 Limnophysikalisches Modell für den Zwenkauer See..... | 58 |
| 5.2.1 Morphologische Analyse des Seebeckens | 58 |
| 5.2.2 Referenzseetyp zum Zwenkauer See | 61 |
| 5.2.3 Meteorologische Daten..... | 61 |
| 5.2.4 Wasserbilanz | 63 |
| 5.2.5 Wasserbeschaffenheiten | 65 |
| 5.2.6 Modellsystem und Modelldiskretisierung..... | 66 |
| 5.2.7 Modellanpassung..... | 67 |
| 5.3 Prognose zu den Auswirkungen des Wärmepumpenbetriebs im Zwenkauer See | 70 |
| 5.3.1 Einfluss der Temperatur auf Struktur und Funktion von Gewässerökosystemen und abzuleitende Vorgaben für die thermische Gewässernutzung..... | 70 |
| 5.3.2 Varianten | 71 |
| 5.3.3 Referenzvariante ohne Wärmepumpenbetrieb | 72 |
| 5.3.4 Limnologische Einflüsse durch Wärmepumpenbetrieb..... | 77 |
| 5.3.5 Auswirkungen auf die Eisbedeckung | 81 |
| 5.3.6 Prognostizierter Wärmepumpenbetrieb | 81 |
| 5.3.7 Ergebnisse | 82 |
| 6 Technisches Konzept und Wirtschaftlichkeit | 83 |
| 6.1 Technisches Konzept | 83 |
| 6.2 Wirtschaftlichkeit | 86 |
| 6.2.1 Einführung..... | 86 |
| 6.2.2 Sensitivitäten..... | 90 |
| 6.2.3 Kostenvergleich..... | 91 |
| 6.2.4 CO ₂ -Emissionen | 93 |
| 6.2.5 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung | 94 |
| 6.3 Förderung und geldwerte Vorteile der Seethermie..... | 95 |
| 6.3.1 Förderung | 95 |
| 6.3.2 Geldwerte Vorteile | 96 |
| 7 Genehmigungsfähigkeit | 99 |
| 7.1 Rechtliche Grundlagen | 99 |
| 7.2 Genehmigungsfähigkeit..... | 103 |
| 7.3 Hilfestellungen zur Genehmigungsfähigkeit | 105 |
| 7.4 Sichtweise der Behörden..... | 106 |

| | |
|---|------------|
| 8 Zusammenschau der Ergebnisse, deren Übertragbarkeit sowie Ausblick..... | 113 |
| 8.1 Ergebnisse..... | 113 |
| 8.2 Übertragbarkeit..... | 117 |
| 8.3 CHECKLISTE für die Entscheidungsfindung und Vorbereitung einer Seethermie- Nutzung in Tagebaurestseen unter Verwendung der Vakuum-Flüssigeis- Technologie | 118 |
| 8.4 Ausblick..... | 119 |
| Literaturverzeichnis | 123 |
| ANLAGE 1: Übersicht zu Wärmenetzen | 127 |
| ANLAGE 2: Detailübersicht zu den Investitionskosten | 130 |
| ANLAGE 3: Verteilung der Wärmebedarfe für räumliche Cluster der Wärmeanlage.. | 132 |



Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Teilprozesse einer Seethermie-Anlage mit beispielhaften Temperaturniveaus im Vergleich zu herkömmlichen Anlagen (1: Wärmeentzug, 2: Wärmetransformation, 3: Wärmeverteilung) | 6 |
| Abbildung 2: Vergleich geschlossenes (links) und offenes System (rechts) (in Anlehnung an (Kammer et al. 2015)) | 6 |
| Abbildung 3: Schema eines Energiesystems mit Zwischenkreislauf (Schwinghammer 2012)..... | 7 |
| Abbildung 4: Funktionsweise Vakuumeis-/Direktverdampfung..... | 9 |
| Abbildung 5: Massenbilanz des Vakuumeisprozesses und Phasendiagramm von Wasser | 10 |
| Abbildung 6: Vergleich der Betriebsarten der Vakuum-Eis- /Direktverdampfungsanlage „mit Eisbildung“ (links) und „ohne Eisbildung“ (rechts)..... | 11 |
| Abbildung 7: Betrieb der Direktverdampfung „ohne Eisbildung“ bei höheren Wassertemperaturen, Bsp. 15 °C | 11 |
| Abbildung 8: Benötigte Wasserentnahmemenge in Abhängigkeit von der Wärmeentzugsleistung für verschiedene Entnahmetemperaturen und Betriebscharakteristika, Leistungsbereich bis 500 kW..... | 12 |
| Abbildung 9: Benötigte Wasserentnahmemenge in Abhängigkeit von der Wärmeentzugsleistung für verschiedene Entnahmetemperaturen und Betriebscharakteristika, Leistungsbereich bis 10 MW | 13 |
| Abbildung 10: Maxloidl-Verfahren (Max Loidl 2009)..... | 14 |
| Abbildung 11: Aufbau Limnion Lima-1 (FRANK GmbH 2012)..... | 14 |
| Abbildung 12: Funktionsweise einer Wärmepumpe (Schwinghammer 2012)..... | 15 |
| Abbildung 13: Aufbau des Energiekreislaufes beim Kühlprozess (Schwinghammer 2012). | 16 |
| Abbildung 14: Beispiel einer Anlage zur kombinierten Nutzung des Seewassers für Heizung und Kühlung (Gaudard et al. 2018a)..... | 17 |
| Abbildung 15: Einflussfaktoren und Auswirkungen der Tiefeneinleitung von wärmerem Wasser auf ein Seeökosystem (Gaudard et al. 2018b)..... | 19 |
| Abbildung 16: Konzeptionelles Modell für die Auswirkungen thermischer Seeenergienutzung (Gaudard et al. 2018b) | 20 |
| Abbildung 17: Physiologische Anpassungen von Fischen an bestimmte Temperaturbereiche (Gaudard et al. 2018b)..... | 21 |
| Abbildung 18: Sechs verschiedene Entnahmetiefen des Simstratmodells für den Bodensee (Fink et al. 2014)..... | 22 |
| Abbildung 19: Auswirkungen des Klimawandels und der Wärmeentzugsleistung (HE) auf die Wassertemperatur in verschiedenen Seetiefen (Fink et al. 2014) | 23 |
| Abbildung 20: Schemaskizze der Wärmepumpenanlage im Rathaus Zürich aus 1938 (Schwinghammer 2012) | 24 |
| Abbildung 21: Schema der Energienutzung des Spitals Männersdorf (Stocker und Abt 2012)..... | 25 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 22: Gebiet Zug (Stadt) und Baar-Süd, Versorgung des gesamten Gebiets bis 2040 geplant. Die farblich abgegrenzten Bereiche stellen die Quartiere dar (Tschan und Watts 2018)..... | 26 |
| Abbildung 23: Links: der Vortriebsbohrer Isabelle. Rechts: Einbau des Bohrers im Startschacht (Tschan und Watts 2018) | 27 |
| Abbildung 24: Temperaturprofile der unterschiedlichen Tiefen des Zugersees: rot = 15 m; lila = 20 m; blau = 28 m; grün = 30 m (Tschan und Watts 2018)..... | 27 |
| Abbildung 25: Funktionsprinzip von Circulago (Tschan und Watts 2018)..... | 28 |
| Abbildung 26: Das Quartier als Bindeglied zwischen übergeordneten Planungen / Konzepten und gebäudebezogenen Energieeffizienzmaßnahmen (aus (Roselt et al. 2015))..... | 33 |
| Abbildung 27 a) und b): Lage der Hotelanlage ‚Neue Harth‘ südwestlich von Leipzig am Zwenkauer See (labor 4+)..... | 34 |
| Abbildung 28: Anordnung der Feriendörfer (oben rechts) und Vogelperspektive (labor 4+) | 35 |
| Abbildung 29: Administrative Grenzen und Schutzzonen | 36 |
| Abbildung 30: Gebäudetypen der Feriendörfer (labor 4+) | 37 |
| Abbildung 31: Hafendorf und Seedorf stellen den wesentlichen Wärmebedarf | 39 |
| Abbildung 32: Ermittelte Zeitreihe für die Heizlast des Quartiers. | 40 |
| Abbildung 33: Daten der Tauchbasis Zwenkau; Wassertemperatur an der Gewässerbasis in Wassertiefen von 1 m (T1) bis 40 m (T40)..... | 44 |
| Abbildung 34: Daten der Tauchbasis Zwenkau; Wassertemperatur der Gewässerbasis in Wassertiefen von 1 m (T1) bis 40 m (T40) und Windstärke im Zeitraum vom 20.07.2019 0:00 Uhr bis zum 31.07.2019 0:00 Uhr der DWD-Station Leipzig-Holzhausen | 45 |
| Abbildung 35: Detailansicht der Temperaturkurve während des Windereignisses aus Abbildung 34 | 45 |
| Abbildung 36: Geplante Lage der Messbojen und Messpunkte der manuellen Temperaturmessung im Zwenkauer See..... | 48 |
| Abbildung 37: Wassertiefenmessung (HONDEX PS-7), Vorbereitung der Temperaturmessketten..... | 50 |
| Abbildung 38: Setzen der Boje, Einfädeln der Temperaturmesskette; Installation des Datenloggers und der Funkübertragungseinheit | 50 |
| Abbildung 39: Messboje JG-01..... | 51 |
| Abbildung 40: Manuelle Aufnahme von Temperaturtiefenprofilen | 51 |
| Abbildung 41: Temperaturtiefenprofile am Messpunkt OW 2 von Juli 2020 bis Mai 2021 | 52 |
| Abbildung 42: Temperaturtiefenprofile aller vier Messpunkte (OW 1 – OW 4); links September 2020, rechts Februar 2021..... | 52 |
| Abbildung 43: Ganglinien der 22 Temperatursensoren der Messstelle JG-03..... | 53 |
| Abbildung 44: Idealisierter Ablauf der thermischen Schichtung in einem tiefen See in Mitteleuropa vom Winter bis zum Herbst (dimiktischer Schichtungstyp der gemäßigten Breiten), eigene Grafik der Autoren | 56 |
| Abbildung 45: Relative Algenbiomasse und ihre Tiefenverteilung in Seen mit unterschiedlichem Trophiegrad (wikipedia 2021). | 57 |
| Abbildung 46: Morphometrie des Zwenkauer Sees (eigene Darstellung IWB unter Nutzung zur Verfügung gestellter Daten)..... | 59 |



| | |
|---|----|
| Abbildung 47: Morphometrische Kennlinien des Zwenkauer Sees (eigene Darstellung IWB unter Nutzung zur Verfügung gestellter Daten)..... | 60 |
| Abbildung 48: Tiefenschnitt des Zwenkauer Sees in der Nähe des Hafen- und Seedorfes mit siebenfacher Überhöhung (eigene Darstellung IWB unter Nutzung zur Verfügung gestellter Daten)..... | 60 |
| Abbildung 49: Klimatische Wasserbilanz des Zwenkauer Sees mit einer mittleren Tiefe von 18 m, berechnet auf der Grundlage der meteorologischen Messreihe von 2011 bis 2020 der DWD-Station Leipzig-Holzhausen..... | 63 |
| Abbildung 50: Wasserbilanz des Zwenkauer Sees für den Anpassungszeitraum von 2015 bis 2021 (oben) und für die Prognosevariante ohne Wärmepumpenbetrieb (unten) (eigene Darstellung IWB unter Nutzung zur Verfügung gestellter Daten der LMBV) | 64 |
| Abbildung 51: Vergleich der gemessenen Wasserstände und Tiefenprofile (rot) für Temperatur und Sauerstoff an der Messstelle RZS2 mit der Modellanpassung (blau) für den Zwenkauer See..... | 69 |
| Abbildung 52: Lage der repräsentativen Stellen des Zwenkauer Sees für die Konturgrafiken des limnophysikalischen Modells (eigene Darstellung IWB unter Nutzung zur Verfügung gestellter Daten) | 71 |
| Abbildung 53: Konturdiagramm der berechneten Entwicklung der Wassertemperatur im Zwenkauer See unter dem Witterungseinfluss des hydrologischen Jahres 2013, Seemitte (Segment 14), Referenzvariante ohne Wärmepumpenbetrieb | 73 |
| Abbildung 54: Räumliche Entwicklung der Temperaturschichtung des Zwenkauer Sees für die hydrologischen Modelljahre 2011 bis 2021 | 74 |
| Abbildung 55: Räumliche Entwicklung der Sauerstoffsättigung des Zwenkauer Sees für die hydrologischen Modelljahre 2011 bis 2021..... | 76 |
| Abbildung 56: Räumliche Entwicklung der Differenzen der Temperaturschichtung zwischen der Referenzvariante und der Variante mit Wärmepumpenbetrieb im Zwenkauer See für die hydrologischen Modelljahre 2011 bis 2021 | 78 |
| Abbildung 57: Räumliche Entwicklung der Differenzen des Sauerstoffgehalts zwischen der Referenzvariante und der Variante mit Wärmepumpenbetrieb im Zwenkauer See für die hydrologischen Modelljahre 2011 bis 2021..... | 80 |
| Abbildung 58: Summenhäufigkeit der Wassertemperaturen an der Entnahmestelle (links) und der resultierenden Entnahmemengen (rechts) für die Vakuum-Flüssigeis-Anlage | 82 |
| Abbildung 59: Übersicht zu den Systemkomponenten Wärmeversorgung..... | 85 |
| Abbildung 60: Darstellung der Elemente der Wärmeversorgung für das Quartier ‚Neue Harth‘ | 86 |
| Abbildung 61: Aufbau des technischen Modells zur Berechnung des Strombedarfes | 87 |
| Abbildung 62: Verteilung der Gesamtkosten für die Investition | 88 |
| Abbildung 63: Jährliche Kosten nach Kostengruppen gemäß VDI 2067 ohne Förderung | 89 |
| Abbildung 64: Einfluss des Strompreises (in €/kWh) und der Förderquote (in %) auf den Wärmemischpreis (in €ct/kWh)..... | 90 |
| Abbildung 65: Einfluss der Variablen auf den Wärmemischpreis..... | 91 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 66: Heizkostenvergleich anhand des Neubaus 6-Familienhaus Mindeststandard GEG (nach BDEW-Heizkostenvergleich 2021), ohne Förderung..... | 92 |
| Abbildung 67: Heizkostenvergleich anhand des Neubaus 6-Familienhaus Mindeststandard GEG (nach BDEW-Heizkostenvergleich 2021), mit Förderung..... | 93 |
| Abbildung 68: CO ₂ -Emissionen anhand des Neubaus 6-Familienhaus Mindeststandard GEG (nach BDEW-Heizkostenvergleich 2021). | 93 |
| Abbildung 69: CO ₂ -Bepreisung- Zusammenstellung aus verschiedenen Quellen (siehe Legende) | 94 |
| Abbildung 70: Rechtsrahmen Nachnutzung Tagebaurestseen | 103 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Tabelle 1: Technische Daten Wärmepumpenanlage Walche (Schwinghammer 2012)..... | 29 |
| Tabelle 2: SWOT-Analyse zur Nutzung von Seethermie..... | 32 |
| Tabelle 3: Ergebnisse der Bestimmung der Heizlast aus den Nutzungseinheiten des Masterplans..... | 38 |
| Tabelle 4: Ergebnisse der Bestimmung des Gesamtwärmebedarfes aus den Nutzungseinheiten des Masterplans..... | 38 |
| Tabelle 5: Recherchierte Daten der LMBV | 42 |
| Tabelle 6: Übersicht über die installierten Temperaturmessbojen | 47 |
| Tabelle 7: Messtage manueller Tiefenprofilmessungen..... | 47 |
| Tabelle 8: Lage der Messbojen (Koordinaten, Gemarkung, Flurstück)..... | 47 |
| Tabelle 9: Koordinaten der endgültigen Lage der Messbojen..... | 50 |
| Tabelle 10: Koordinaten der Messpunkte für manuelle Tiefenprofile | 51 |
| Tabelle 11: Morphometrische Kennwerte des Zwenkauer Sees..... | 58 |
| Tabelle 12: Meteorologische Kennwerte und ihre zeitliche Auflösung. | 62 |
| Tabelle 13: Mittelwerte hydrochemischer und –physikalischer Parameter des Zwenkauer Sees aus dem Jahr 2017 (LfULG 2021). | 65 |
| Tabelle 14: Abweichung der Modellanpassung von den verwendeten Messwerten für den Zwenkauer See sowie verwendete Messstellen und Anzahl der Messungen ... | 68 |
| Tabelle 15: Dauer der Eisbedeckung sowie mittlere und maximale Eisdicke für alle Modellbereiche des Zwenkauer Sees während des Modellzeitraums für die Referenzvariante (Var 0) und die Variante mit Wärmepumpenbetrieb (Var 1) .. | 81 |
| Tabelle 16: Grobe Auslegung der Netzinfrastruktur..... | 84 |
| Tabelle 17: Jährliche Kosten nach Kostengruppen gemäß (VDI 2067) | 89 |
| Tabelle 18: Bilanz der thermischen Arbeit der Wärmepumpenanlage und des Zwenkauer Sees..... | 117 |

Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Bedeutung |
|------------------|---|
| BAFA | Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle |
| BbgWG | Brandenburgisches Wassergesetz |
| BDEW | Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. |
| BMU | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit |
| BNatschG | Bundesnaturschutzgesetz |
| COP | Coefficient of Performance (dt. Leistungszahl) |
| DWD | Deutscher Wetterdienst |
| EER | Energy Efficiency Ratio (dt. Leistungszahl) |
| GEG | Gebäudeenergiegesetz |
| HOAI | Honorarordnung für Architekten und Ingenieure |
| KfW | Kreditanstalt für Wiederaufbau |
| KWK | Kraft-Wärme-Kopplung |
| LMBV | Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH |
| MLUK | Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz Brandenburg |
| MWAE | Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Energie Brandenburg |
| OGewV | Oberflächengewässerverordnung |
| OWB | Obere Wasserbehörde |
| PtJ | Projektträger Jülich |
| RoV | Raumordnungsverfahren |
| SächsWG | Sächsisches Wassergesetz |
| SEER | Seasonal Energy Efficiency Ratio (dt. Jahresarbeitszahl) |
| SJAZ | Systemjahresarbeitszahl |
| SMEKUL | Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft |
| SÜS | Seewasser-Übergabe-Station |
| ThürWG | Thüringer Wassergesetz |
| TLUBN | Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz |
| UVP | Umweltverträglichkeitsprüfung |
| UVPG | Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung |
| UWB | Untere Wasserbehörde |
| VFA | Vakuum-Flüssigeis-Anlage |
| WRRL | Wasserrahmenrichtlinie |

Zusammenfassung

Die Gewinnung thermischer Energie aus Seewasser – Seethermie – erfährt bislang in Deutschland keine bekannte Nutzung. Die Abkehr von fossilen Energieträgern mit der Zuwendung zu einer klimaneutralen Wärmeversorgung, die stürmische Entwicklung neuer Technologien zur Wärmegewinnung und -umwandlung und nicht zuletzt der Strukturwandel in Mitteldeutschland mit dem entstandenen Potenzial zahlreicher Seen rückt die Frage nach der Nutzbarkeit dieser Gewässerkörper für eine alternative Wärmeversorgung in den Fokus.

Diese Studie untersucht im Auftrag der Europäischen Metropolregion Mitteldeutschland die Nutzungsoptionen von Seethermie anhand des exemplarischen Standortes eines künftigen Quartiers am Nordufer des Zwenkauer Sees im Südraum von Leipzig.

Im Rahmen dieser Expertise wurden umfangreiche einjährige Untersuchungen am Gewässerkörper, seinen saisonalen Temperaturschichtungen und deren Beeinflussungen durchgeführt und mögliche Auswirkungen der Entnahme und Rückführung von Wasser für eine Wärmeversorgung des Quartiers auf die Limnologie des Sees untersucht. In Folge dieser Erhebungen wurden eine technologische Konfiguration für ein Wärmeversorgungssystem entwickelt, deren Wirtschaftlichkeit optimiert sowie die Genehmigungsfähigkeit und die ökologischen Auswirkungen (CO₂-Footprint) des Gesamtsystems untersucht.

Das technologische Grundkonzept beinhaltet die Nutzung des Vakuum-Flüssigeis-Verfahrens, eine Innovation des Instituts für Luft- und Kältetechnik GmbH Dresden, mit dem entnommenem Seewasser auf intelligente und energiesparende Weise Wärme entzogen wird. In der Anlage erfolgt eine Direktverdampfung, bei der das Seewasser gleichzeitig als Kältemittel dient. Der Wasserdampf ist Träger der dem Seewasser entzogenen Wärme. Er wird vom Verdichter auf ein höheres Druckniveau komprimiert und gibt auf einem höheren Temperaturniveau die Wärme ab. Diese wird zur Belieferung von Primär- und Sekundärkreisläufen („kalte intelligente Netze“) für die drei am Seeufer entstehenden Dörfer des Quartiers verwendet. Das entwärmte Wasser wird mit einer geringfügig niedrigeren Temperatur und im Winter mit einem gewissen Eisanteil in den See zurückgeführt.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass Seethermie in Kombination mit der Vakuum-Flüssigeis-Technologie einen wichtigen Beitrag zum Versorgungsmix einer grünen Wärmewende leisten kann. Unter den Bedingungen des exemplarischen Standortes kann die Technologie verfahrenstechnisch sinnvoll konfiguriert und eingesetzt, vergleichsweise wirtschaftlich betrieben, umweltverträglich gestaltet und von den zuständigen Behörden genehmigt werden. Die CO₂-Bilanz wird mit ‚sehr gut‘ bewertet.

Die Ergebnisse werden auch im Hinblick auf eine Übertragbarkeit positiv bewertet. Zur künftigen Einschätzung der seethermischen Potenziale von Gewässern empfehlen die Autoren der Studie die Entwicklung eines Seethermie-Nutzbarkeitsindex SN_{ix} . Er wird aus dem Quotienten der thermischen Leistung bzw. Arbeit aller installierter und geplanter Wärmepumpen und der des Gewässers gebildet. Mit diesem Index lässt sich die

Schwelle abschätzen, bis zu der die Auswirkungen der Summe der thermischen Nutzungen zu keiner nachweisbaren Beeinträchtigung des gewässerökologischen Zustands führen. Damit wird die Voraussetzung für eine Genehmigungsfähigkeit als eine Rahmenbedingung gegeben, innerhalb derer weitere objekt-spezifische Festlegungen zur seethermischen Nutzung zu treffen sind.

Mit der Bilanz der Wärmearbeit ist jedoch noch keine Aussage zu den gewässerökologischen Auswirkungen getroffen. Bezüglich der Übertragbarkeit gibt es zunächst keine signifikanten Hinweise, dass in anderen Tagebaurestseen die Situation grundsätzlich anders wäre, dennoch ist jedes Gewässer aufgrund seiner Individualität gesondert zu betrachten. Grundsätzlich ist jeder See, ob natürlicher oder Bergbaufolgesee, ein Individuum hinsichtlich seiner Morphometrie, seines Schichtungsverhaltens, seines Stoffhaushaltes und seiner Biozönosen. Für die Lösung dieser Aufgaben helfen die Erfahrungen aus dieser Studie.

Weiterhin legen die Autoren eine Checkliste vor, die künftigen Seethermie-Nutzer:innen Handreichung für die Schritte auf dem Wege bis zur Umsetzung gibt.

Abschließend werden durch das mittel- und ostdeutsche Expertengremium Empfehlungen gegeben, wie Seethermie künftig bei der energetischen Transition eine gewichtige Rolle spielen kann; nämlich, wenn es gelingt, die Ergebnisse dieser Studie in einen Roll-out zu überführen und dafür alle relevanten Stakeholder zu aktivieren.

Sowohl die Vakuum-Flüssigeis-Anlage als auch deren Anwendung für die seethermische Nutzung ist eine grundsätzlich anwendungsreife Technologie. Die zeitnahe Errichtung eines Piloten hilft, Restfragen z.B. bei der Fahrweise zu klären, die Wirtschaftlichkeit an der existierenden Anlage nachzuweisen, öffentliches Interesse zu wecken sowie Investoren und Multiplikatoren einzuwerben.

Die weitere wissenschaftliche Forschung auf diesem Gebiet ist unabhängig von der Etablierung des Piloten und sollte von den renommierten Forschungseinrichtungen der Region im Verbund mit mittelständischen Ingenieur:innen für eine Weiterentwicklung der Technologie und ihrer Anwendbarkeit betrieben werden.

Die hier besonders ausgeprägten regionalen Geopotenziale der Tagebaurestseen für die Seethermie und der mächtigen Aquifere des geologischen Weißelsterbeckens für eine grüne Wärmespeicherung sind schlussendlich herausragende Inhalte und ein Gedankenanstoß zur Etablierung eines Kompetenzzentrums in der Region.

Aktuell und essenziell jedoch ist eine positive Kommunikation der Seethermie als das, was sie tatsächlich darstellt: Ein enorm großes natürliches, umweltfreundliches, energetisches Potenzial, das mit Hilfe der in Mitteldeutschland ansässigen Ingenieurskompetenz und der an der Transformation beteiligten Strukturen als Chance für einen erfolgreichen Strukturwandel zu nutzen ist.

1 Motivation

Die Abkehr von der fossilen Wärme und der Klimanotstand Leipzigs befeuern die Entwicklung alternativer Energiesysteme sowie die Nutzung lokaler Ressourcen. Von großer Bedeutung für eine solche Transition wird sein, die in der Region Leipzig ausgeprägten besonderen Potenziale für eine lokale und regionale energetische Wertschöpfung zu erschließen. Diese lokaltypischen Potenziale in Bezug einer energetischen Transition sind im Wesentlichen:

- ▶ der Bestandsschutz der Flächen der bisherigen fossilen Energieproduktion für eine künftige Nutzung postfossiler Energieerzeugung, -umwandlung und -speicherung,
- ▶ die weite Verbreitung tertiärer Aquifere mit großen Mächtigkeiten für eine geogene saisonale Wärmespeicherung und
- ▶ die weite Verbreitung von Tagebaurestseen zur Nutzung mit Seethermie.

Bezüglich der Wärmeversorgung gilt als Langfristziel zur Energiewende die Anpassung der Heizsysteme an sogenannte „kalte“ Medien (verlustarme Bereitstellung der Wärmemengen durch große Volumina), die effizient aus regenerativen bzw. sekundären Quellen und Speichern gespeist werden.

Die Seen des Leipziger Neuseenlands und andere geflutete Tagebaue besitzen Potenziale zur Nutzung von Seethermie, aus denen durch Abkühlung ca. 4 GW Wärme sich selbst regenerierend bereitgestellt werden könnten (eigene Berechnung JENA-GEOS®). Um diese Potenziale bedarfsgerecht zu erschließen, ist die Erarbeitung wissenschaftlicher und ingenieurtechnischer Randbedingungen sowie von Grundlagen für die Genehmigungsfähigkeit von großer Bedeutung.

Die beabsichtigte Errichtung eines Hotel- und Erholungskomplexes am Ufer des Zwenkauer Sees bietet einen günstigen Anlass für eine exemplarische Betrachtung einer alternativen erneuerbaren Wärmeversorgung („Seethermie“) in der Skalierung eines Quartiers.

Diese Studie widmet sich der Technischen Machbarkeit (I.), der Wirtschaftlichkeit (II.) und der Genehmigungsfähigkeit (III.) der Nutzung von Seethermie anhand des exemplarischen Standortes eines zukünftigen Quartiers am Zwenkauer See unter Anwendung der sogenannten Vakuum-Flüssigeis-Technologie für die Energiebereitstellung.

Zielstellung:

- I. Im Ergebnis der Studie steht ein technisches Konzept zur Wärme- (und ggf. Kälte-) Versorgung der Gebäude am Nordufer des Zwenkauer Sees, das unter Nutzung der Vakuum-Flüssigeis-Technologie grundsätzlich technisch umsetzbar ist.
- II. Für das technische Konzept (I.) werden Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen unter Berücksichtigung verschiedener Eingangsparameter (ggf. in Varianten) sowie die Gestehungskostenrechnung auf Grundlage einer Sensitivitätsanalyse angestellt.
- III. Unter Nutzung von Praxiserfahrungen (State of the Art), den gewonnenen Daten zur Limnologie des Zwenkauer Sees und den Diskussionen mit den zuständigen Behörden werden die für den exemplarischen Standort zu stellenden Anforderungen an die Umweltverträglichkeit und Genehmigungsfähigkeit formuliert.

Anhand der Ergebnisse I. – III. werden von den Autoren die Übertragbarkeit diskutiert und Hinweise gegeben, welche wesentlichen technischen, ökologischen und rechtlichen Bedingungen bei der thermischen Nutzung von Bergbaufolgeseen im Allgemeinen zu beachten sind.

Die Ergebnisse der Studie sollen Gemeinden, Investor:innen, Forschungseinrichtungen und Genehmigungsbehörden an vergleichbaren Standorten als Basis dienen, um Projekte zur thermischen Seewassernutzung an Tagebaurestseen zu initiieren. Beispielsweise kann hierfür eine Checkliste zur Verfügung gestellt werden.

Für den konkreten Quartiers-Standort am Nordufer des Zwenkauer Sees bildet die Studie eine Grundlage für die weitere Entwicklung der Nutzung des Seethermie-Potenzials und die Planung der nötigen Infrastruktur.

2 State of the Art

2.1 Begriff Seethermie

Hinter dem Begriff der Seethermie verbirgt sich die Gewinnung thermischer Energie aus Seewasser. Diese erneuerbare Energiequelle kann für die zivile Energieversorgung genutzt werden. Besonders geeignet ist sie für seenahe Städte und Gebäude, aber auch in Seenähe gebaute Industrieanlagen können durch Seethermie mit Energie versorgt werden.

Bisher wurde das Potenzial der thermischen Seewassernutzung kaum ausgeschöpft. Erst in den letzten Jahren stieg die Akzeptanz erneuerbarer Energien. Zudem gab es in Bezug auf die ökologischen Folgen und die Finanzierung von Projekten zur Nutzung von Seethermie viele Fragezeichen. So begründete sich das bisherige geringe Interesse in Deutschland auch mit den hohen Stromkosten für den Wärmepumpenbetrieb, die die Anlagen im Vergleich mit anderen Energieträgern unwirtschaftlich zu gestalten schien.

Das seethermische Potenzial in Deutschland ist enorm. 58,73 TWh beträgt der jährliche Wärmebedarf im 1 km-Umkreis aller deutschen Seen mit einer Fläche größer 50 ha. Relativ zum gesamten Wärmebedarf (Haushalte, Industrie, Gewerbe) in Deutschland entspricht das 4,6 % (Kammer et al. 2015). Wird dieses Potenzial zunehmend durch Seethermie gedeckt, kann diese damit einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen dezentralen und nachhaltigen Energieversorgung Deutschlands leisten.

Die beschriebene Abschätzung in Kapitel 1, dass allein die Seen des Leipziger Neuseenlands und andere geflutete Tagebaue seethermische Potenziale besitzen, aus denen durch Abkühlung ca. 4 GW Wärme sich selbst regenerierend bereitgestellt werden könnte, zeigt die Bedeutung dieses Beitrags für einen künftigen Energiemix.

Die in Seen enthaltene Wärme kann nicht direkt zum Heizen verwendet werden, da die Wassertemperatur (in der Heizperiode) unterhalb der gewünschten Raumtemperatur liegt. Daher ist eine Wärmetransformation erforderlich – das Anheben des Temperaturniveaus der Wärme mittels Wärmepumpe. Aus technologischer Sicht kann eine Seethermie-Anlage in die drei Teilprozesse

1. Wärmeentzug,
2. Wärmetransformation (Wärmepumpe),
3. Wärmeverteilung

gegliedert werden (Abbildung 1).

Während der Wärmeentzug stets am Anfang der Prozesskette steht, können Wärmetransformation und Wärmeverteilung in unterschiedlicher Reihenfolge oder auch kaskadiert erfolgen.

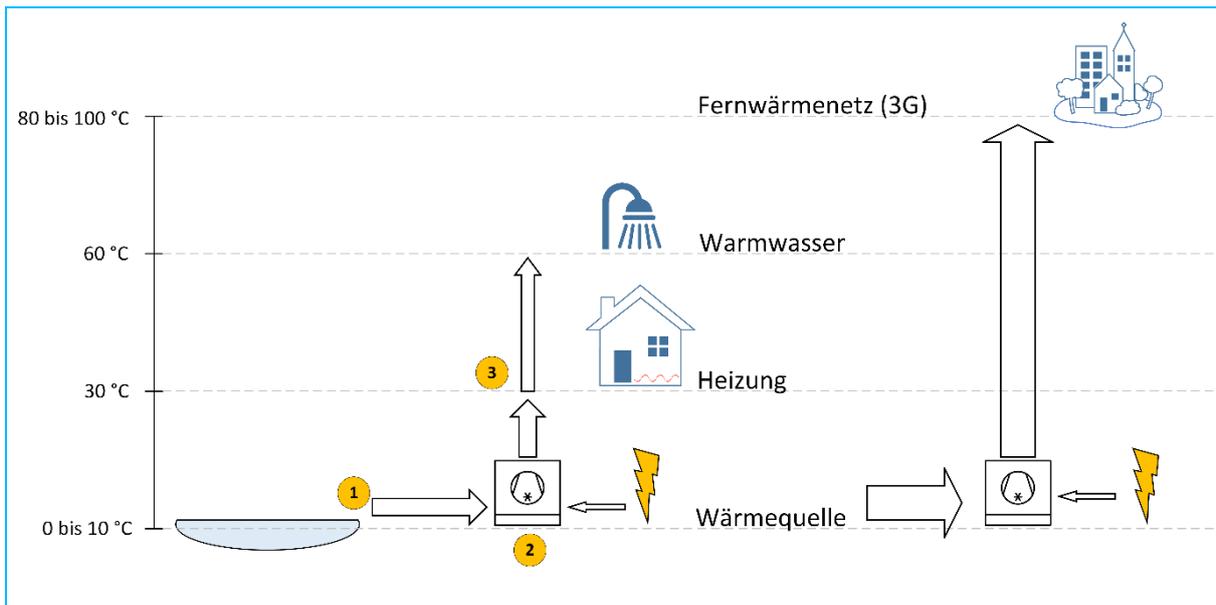


Abbildung 1: Teilprozesse einer Seethermie-Anlage mit beispielhaften Temperaturniveaus im Vergleich zu herkömmlichen Anlagen (1: Wärmeentzug, 2: Wärmetransformation, 3: Wärmeverteilung)

2.2 Technologie

2.2.1 Wärmeentzug aus dem Gewässer

Der Wärmeentzug aus dem Gewässer kann erfolgen mittels (Abbildung 2)

- a) Geschlossenem Kreislauf, d.h. das Eintauchen eines Wärmeübertragers in das Gewässer. Innerhalb des Wärmeübertragers zirkuliert ein Wärmeträger-Medium, das Wärme vom Seewasser aufnimmt und zu einer Wärmepumpe transportiert.

Liegt die Temperatur des (mit einem Frostschutzmittel versetzten) Wärmeträgermediums unter 0 °C, kann es auf der Seewasser-Seite des Wärmeübertragers zu Eisbildung kommen. Die entstehende Eisschicht behindert den Wärmetransport und führt zu einer Reduktion der Wärmeentzugsleistung. Zudem entsteht durch das Eis eine Auftriebskraft, die bei der Verankerung des Wärmeübertragers berücksichtigt werden muss.

oder

- b) Offenem Kreislauf, d.h. Entnahme von Wasser, Abkühlung sowie ggf. teilweise Vereisung und anschließender Wiedereinleitung ins Gewässer

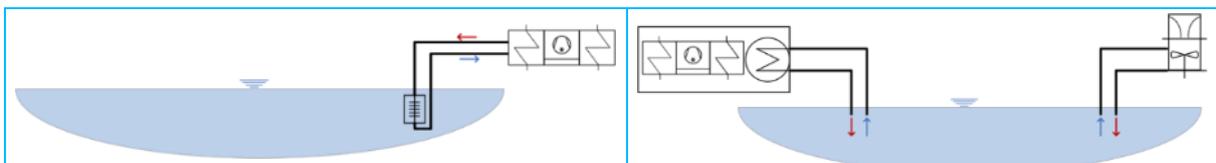


Abbildung 2: Vergleich geschlossenes (links) und offenes System (rechts) (in Anlehnung an (Kammer et al. 2015))

Um zu verhindern, dass der Verdampfer durch eine zu niedrige Temperatur vereist und dabei beschädigt wird, kann ein Zwischenkreislauf z.B. mit einem Frostschutzmittel eingebaut werden (Abbildung 3). Dadurch wird das Gewässer zusätzlich gesichert, da bei einer Störung oder Beschädigung der Kältemittelleitungen der Kontakt mit dem Seewasser ausgeschlossen werden kann. Das Vereisungsrisiko wird in den zusätzlichen Wärmeübertrager verlagert. Der Nachteil dabei ist, dass mehr Energie benötigt wird (Schwinghammer 2012).

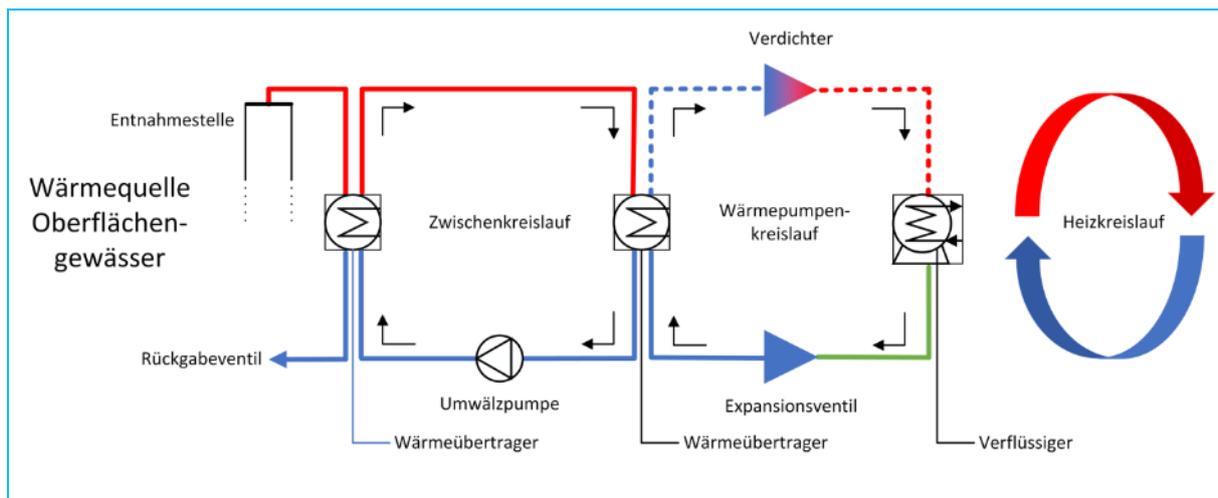


Abbildung 3: Schema eines Energiesystems mit Zwischenkreislauf (Schwinghammer 2012)

Die dem Seewasser entzogene Wärme kann sich aus physikalischer Sicht aus zwei „Wärmearten“ zusammensetzen, der sensiblen und der latenten Wärme.

$$Q_{ges} = Q_{sens} + Q_{lat}$$

1. Die sensible Wärme („fühlbare“ Wärme) ergibt sich aus der Abkühlung, also einer Temperaturänderung des Wassers, zwischen Entnahme aus dem Gewässer bzw. dem Eintritt in einen Wärmeübertrager und der Rückgabe ins Gewässer bzw. dem Austritt aus dem Wärmeübertrager. Die sensible Wärmemenge (Q_{sens}) ist proportional zur Wassermenge (m), der Temperaturdifferenz (ΔT) zwischen Ein- und Austritt und der spezifischen Wärmekapazität von Wasser (c_p).

$$Q_{sens} = m * c_p * \Delta T = m * c_p * (T_{Ein} - T_{Aus})$$

Beispiel:

Wassermenge: 1.000 kg

Temperatur Seewasser: 6 °C

Abkühlung des Wassers auf: 2 °C

$$Q_{sens} = 1.000 \text{ kg} * 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} * (6 \text{ °C} - 2 \text{ °C}) = 16.720 \text{ kJ} = 4,6 \text{ kWh}$$



In Anlagen mit einem klassischen Wärmeübertrager¹ kann das Wasser nur bis minimal ca. 2 °C abgekühlt werden. Ansonsten besteht die Gefahr, dass an weniger durchströmten Stellen im Wärmeübertrager Eis entsteht und durch die Ausdehnung beim Gefrieren der Wärmeübertrager zerstört wird.

- Die latente Wärme („nicht fühlbare“ Wärme) ist die Energie des Phasenwechsels, also der Änderung des Aggregatzustandes von flüssig (Wasser mit 0 °C) zu fest (Eis mit 0 °C). Die latente Wärme ist proportional zur Wassermenge, der Gefrier- bzw. Schmelzwärme (Δh_{fus}) und dem Eis-anteil (x_{Eis}) nach dem Wärmeentzug.

$$Q_{lat} = m * \Delta h_{fus} * x_{Eis}$$

Beispiel:

Wassermenge: 1.000 kg

Temperatur Seewasser: 0 °C

Eisanteil vor Wärmeentzug: 0 %

Eisanteil nach Wärmeentzug: 40 %

$$Q_{lat} = 1.000 \text{ kg} * 333,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 0,4 = 133.400 \text{ kJ} = \mathbf{37 \text{ kWh}}$$

Die Beispielrechnungen zeigen, dass aus der gleichen Wassermenge durch latenten Wärmeentzug (37 kWh) wesentlich mehr Wärme entzogen werden kann als durch Abkühlung (5 kWh).

2.2.1.1 Vakuumeis-/ Direktverdampfungs-Technologie

Die Vakuumeis-Technologie ist eine besondere Form eines offenen Systems, bei dem das Seewasser gleichzeitig als Kältemittel dient (vgl. Begriffsklärung im Abschnitt Wärmepumpen). Im Gegensatz zu einem konventionellen Seewasser-Wärmeübertrager erfolgt in der Vakuumeis-/Direktverdampfungsanlage neben dem Wärmeentzug auch eine (erste) Erhöhung des Temperaturniveaus der dem Seewasser entnommenen Wärme.

Die Funktionsweise wird anhand von Abbildung 4 und Abbildung 5 beschrieben. Ausgehend vom Gewässer wird das Seewasser in den Direktverdampfer gefördert. Der Druck im Direktverdampfer ist abhängig von der Verdampfungsstemperatur. Bei einer Verdampfungsstemperatur von 0 °C beträgt der Druck 6 mbar absolut, also ca. 994 mbar unter Umgebungsdruck. Diese Zustandsgrößen charakterisieren den Tripelpunkt von Wasser, bei dem die flüssige, dampfförmige und feste Phase in einem thermodynamischen Gleichgewicht vorliegen. Durch das Absaugen des Wasserdampfes wird das Gleichgewicht gestört und die Verdampfung von Wasser angeregt. Die für die Verdampfung notwendige Energie wird durch die Entstehung von Eiskristallen bereitgestellt (Erstarrungs- oder auch Kristallisationsenthalpie).

¹ Wärmeübertrager mit stofflicher Trennung zwischen dem (See-)Wasser und dem Kältemittel in der Wärmepumpe – dies betrifft sowohl die Anlagen mit offenem als auch mit geschlossenem Kreislauf.

Die Verdampfungsenthalpie ist 7,5-mal größer als die Erstarrungsenthalpie, d.h. wird 1 kg Wasser verdampft, gefrieren gleichzeitig 7,5 kg Wasser zu Eis. Der Verdampfungs- und Eisentstehungsprozess findet an der Wasseroberfläche im Direktverdampfer statt (Phasengrenzfläche). Durch Rühren des Wasserinhaltes im Direktverdampfer wird die Ausbildung einer geschlossenen Eisoberfläche verhindert. Es entsteht ein pumpfähiges Gemisch aus Wasser und Eiskristallen: Flüssigeis (auch ‚Eisbrei‘ genannt).

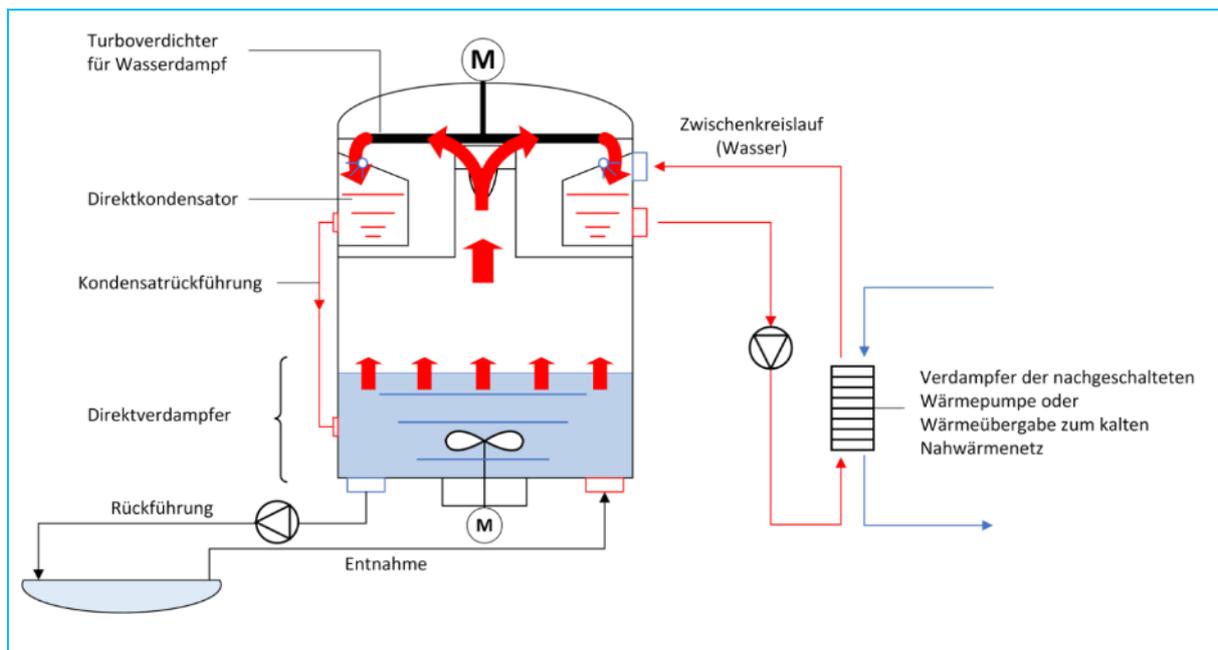


Abbildung 4: Funktionsweise Vakuumeis-/Direktverdampfung

Der Wasserdampf ist Träger der dem Seewasser entzogenen Wärme. Er wird vom Verdichter auf ein höheres Druckniveau komprimiert² und kann dann auf einem höheren Temperaturniveau die Wärme an den Wärmeträger (Zwischenkreislauf-)Wasser abgeben. Dies erfolgt durch Kondensation des Wasserdampfes im Direktkondensator. Der verdichtete Wasserdampf kondensiert in das versprühte Wasser des Zwischenkreislaufes (Abbildung 4). Im Zwischenkreislauf liegt die dem Seewasser entzogene Wärme³ nun auf einem höheren Temperaturniveau vor und kann einer nachgelagerten Wärmepumpe zur weiteren Temperaturerhöhung zur Verfügung gestellt oder direkt zur Heizung eines Gebäudes⁴ genutzt werden.

Das bei der Kondensation des Wasserdampfes entstehende Kondensat (Wasser) wird kontinuierlich in den Direktverdampfer und zusammen mit dem entstandenen Flüssigeis

² Prozessverlauf entlang der Dampfdruckkurve in Abb. 5

³ und zusätzlich die durch den Antrieb des Turboverdichters in den Prozess eingebrachte Energie

⁴ Der mit einem einstufigen Wasserdampfverdichter erreichbare Temperaturhub ist begrenzt, so dass diese Variante nur bei vergleichsweise hohen Seewassertemperaturen und niedrigen Heiztemperaturen, z.B. Betonkernaktivierung, einsetzbar ist.

in das Gewässer zurückgeführt. Dem Gewässer wird somit die gleiche Menge (Masse) an Wasser (flüssige und feste Phase) zurückgegeben wie entnommen wurde.

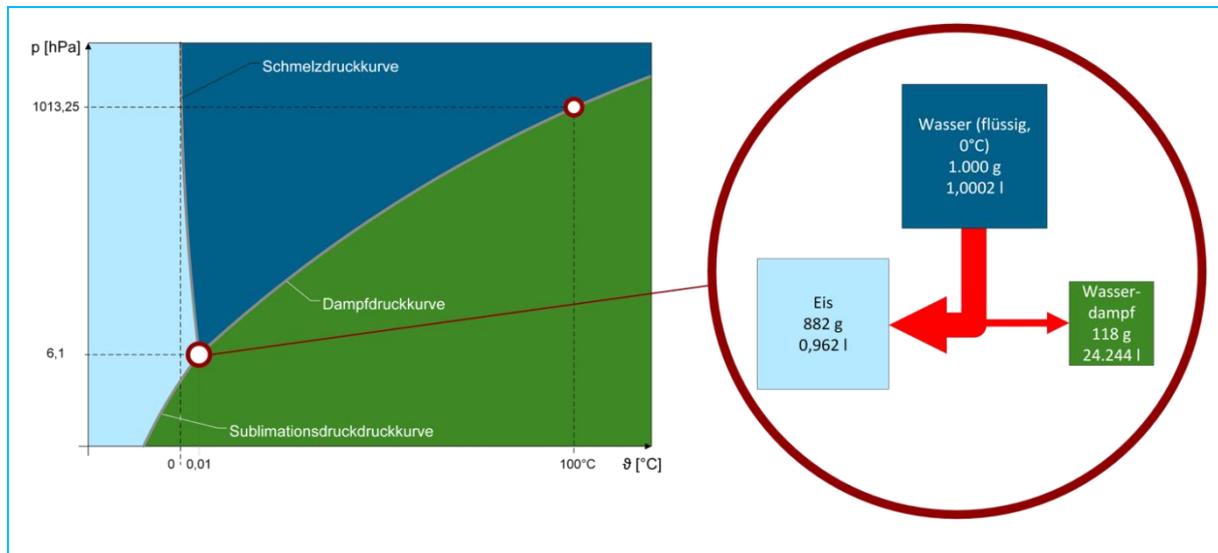


Abbildung 5: Massenbilanz des Vakuumeisprozesses und Phasendiagramm von Wasser

Eine Vakuumeis-/Direktverdampfungsanlage kann sowohl die sensible als auch die latente Wärme des Wassers nutzen, wobei ein Betrieb in zwei Modi möglich ist:

- a) Betrieb mit Eisbildung, d.h. Abkühlung und anschließende Teilvereisung:

Die Verdampfungstemperatur beträgt hierbei ca. 0 °C. Es wird sowohl die maximal mögliche sensible als auch die latente Wärme des Wassers genutzt (Abkühlung bis auf Gefrierpunkt).

- b) Betrieb ohne Eisbildung, d.h. nur Abkühlung des Wassers:

Die Verdampfungstemperatur kann frei gewählt werden und bestimmt die Austrittstemperatur, mit der das Wasser ins Gewässer zurückgegeben wird. Je höher die Verdampfungstemperatur, umso höher die Effizienz des Wärmepumpenprozesses. Allerdings bedeutet eine höhere Verdampfungstemperatur eine geringere Abkühlung des Wassers. Für eine vorgegebene, erforderliche Wärmemenge muss dann mehr Wasser entnommen bzw. mit dem Gewässer ausgetauscht werden (s.a. Abbildung 6). Die Übergabe der Wärme an die nachgelagerten Systemkomponenten (Wärmepumpe, Netz...) kann auf einem höheren Temperaturniveau erfolgen. Aufgrund der höheren Dampfdichte kann mit dem gleichen Wasserdampfverdichter ein größerer Massenstrom gefördert und damit die Wärmeentzugsleistung einer gegebenen Anlage gesteigert werden.

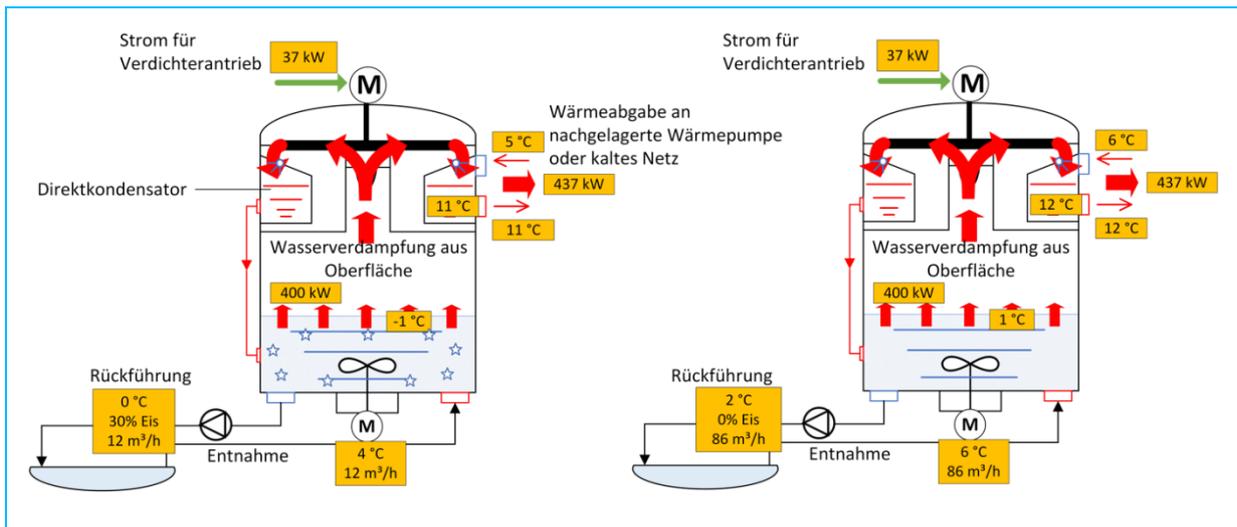


Abbildung 6: Vergleich der Betriebsarten der Vakuüm-Eis- /Direktverdampfungsanlage „mit Eisbildung“ (links) und „ohne Eisbildung“ (rechts)

Temperaturspreizung zwischen Entnahme und Wiedereinleitung

Im Betrieb mit Eisbildung beträgt die Temperatur des wieder einzuleitenden Wasser-Eis-Gemisches (Flüssigeis) 0 °C. Die Temperaturspreizung ergibt sich somit aus der Entnahmetemperatur und dem Gefrierpunkt von 0 °C.

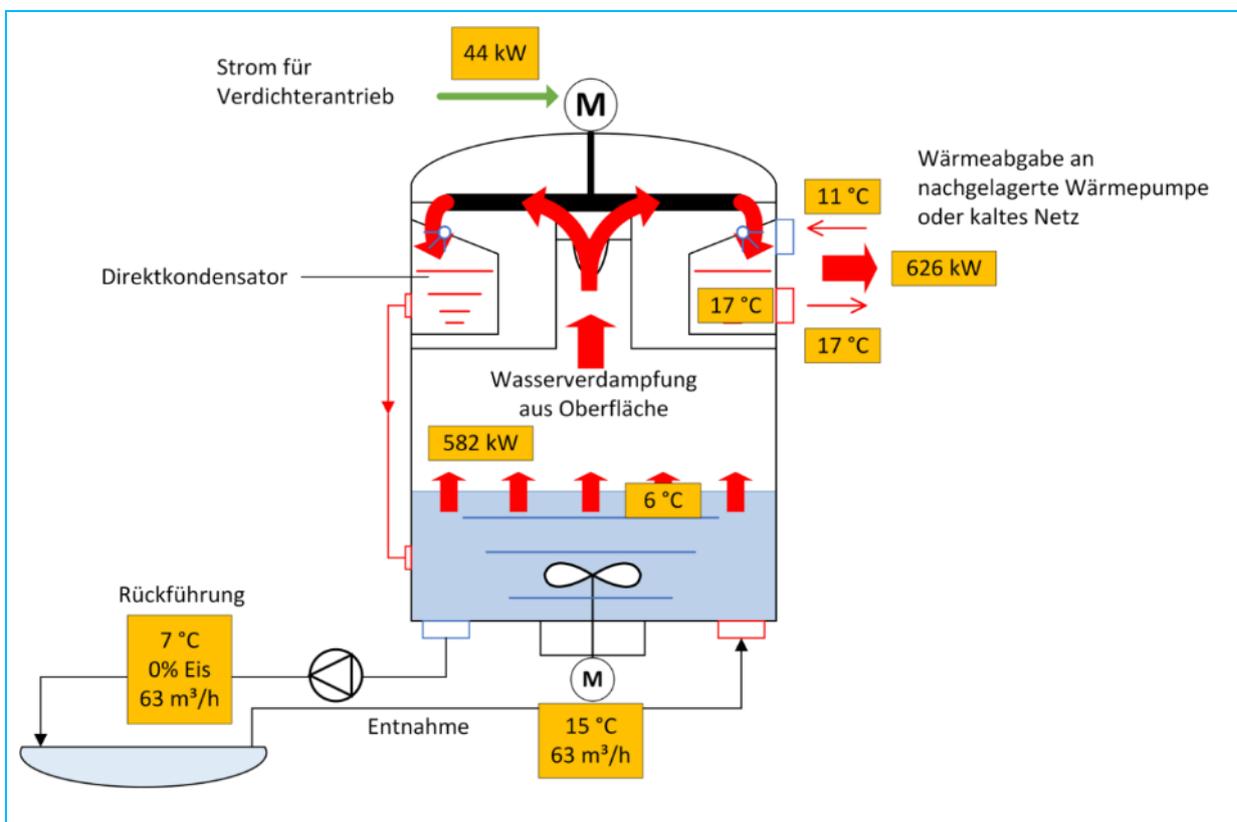


Abbildung 7: Betrieb der Direktverdampfung „ohne Eisbildung“ bei höheren Wassertemperaturen, Bsp. 15 °C

Im Betrieb ohne Eisbildung (Abbildung 7) kann die Temperaturspreizung unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten „frei“ festgelegt werden. Sie wird typischerweise zwischen 3 und 15 Kelvin betragen. Folgende Parameter bzw. Einflussfaktoren sollten berücksichtigt werden:

- ▶ Genehmigte Wasserentnahmemenge bzw. Einfluss der Wassermenge auf die Gewässerökologie
- ▶ Energetischer Aufwand für den Transport des Wassers (Pumpen), u.a. abhängig von der Entfernung der Vakuüm-Flüssigeis Anlage vom Gewässer, den Rohrquerschnitten usw.
- ▶ Gesamtenergieeffizienz; eine geringere Spreizung ermöglicht eine höhere Verdampfungstemperatur und damit eine höhere Gesamteffizienz der Wärmepumpenanlage

Entnahmemengen

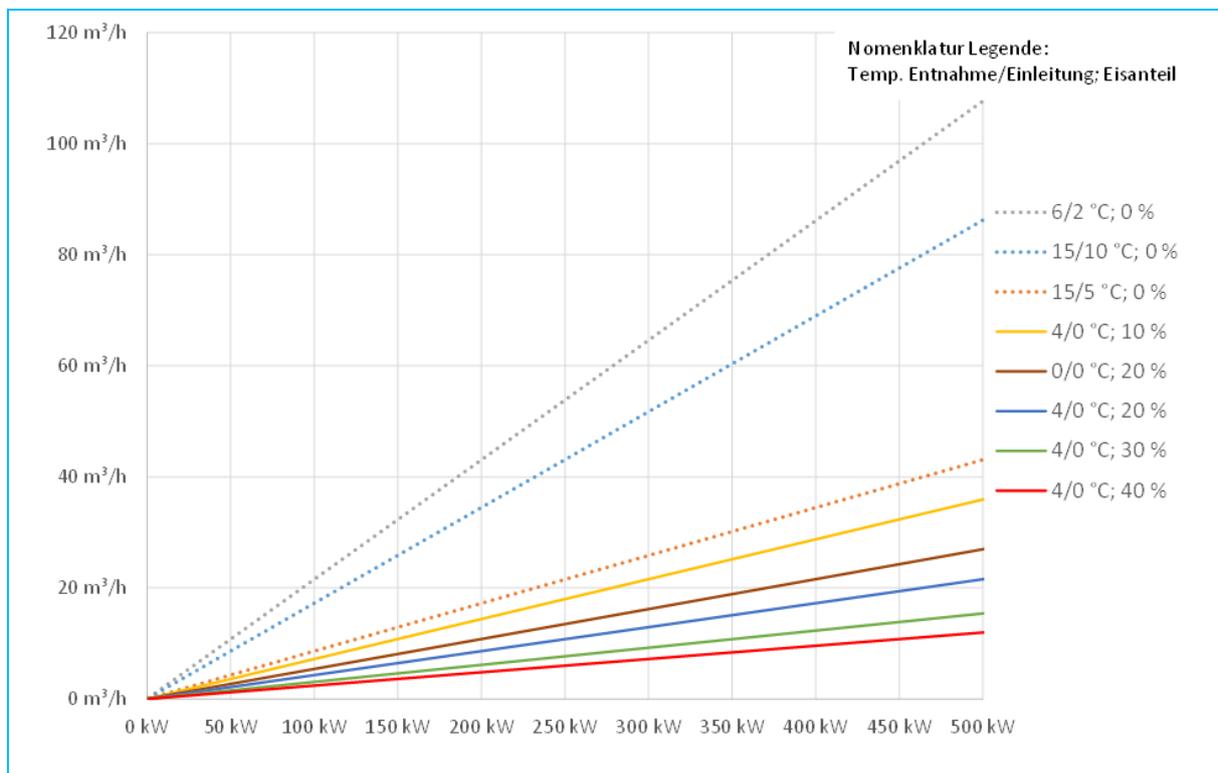


Abbildung 8: Benötigte Wasserentnahmemenge in Abhängigkeit von der Wärmeentzugsleistung für verschiedene Entnahmetemperaturen und Betriebscharakteristika, Leistungsbereich bis 500 kW

Die Wasser-Entnahmemengen sind abhängig von der bereitzustellenden Wärmeleistung, der Wassertemperatur und der Betriebscharakteristik der Vakuüm-Flüssigeis-/Direktverdampfungsanlage (Abbildung 8 und Abbildung 9).

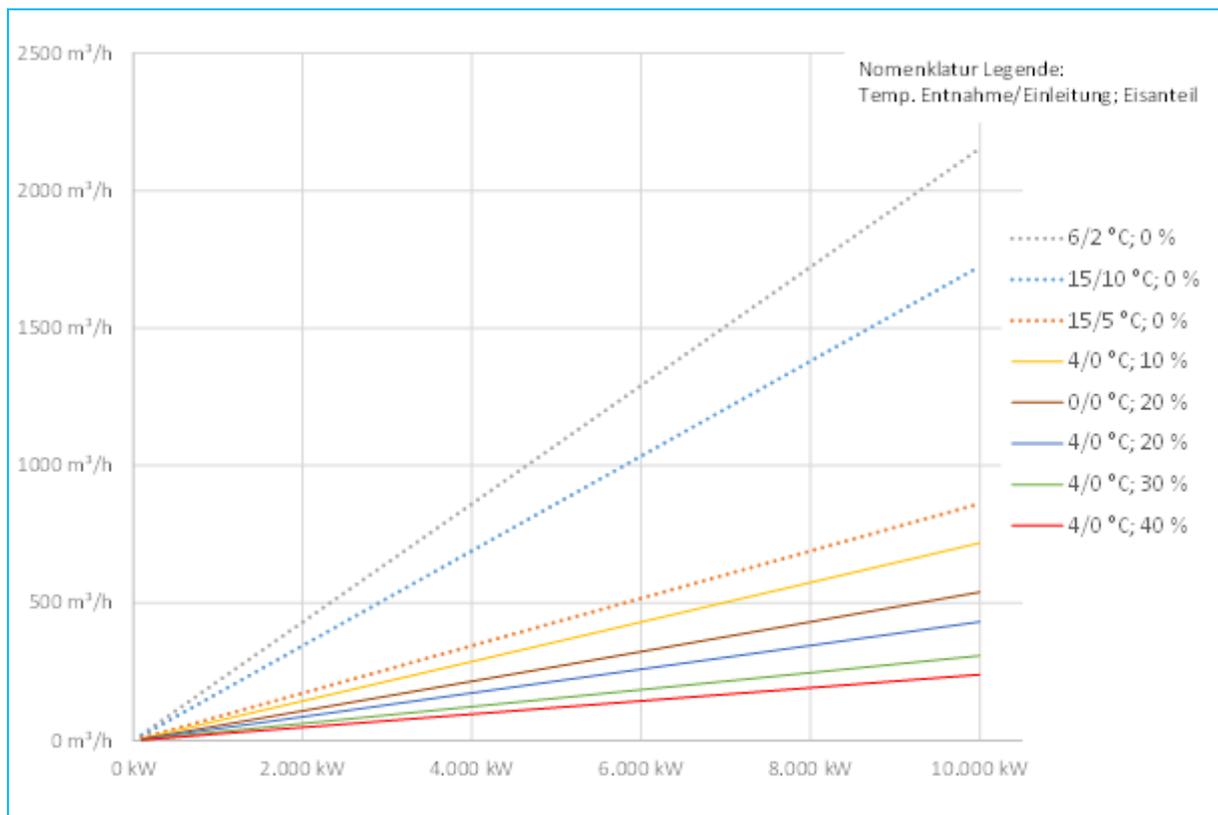


Abbildung 9: Benötigte Wasserentnahmemenge in Abhängigkeit von der Wärmeentzugsleistung für verschiedene Entnahmetemperaturen und Betriebscharakteristika, Leistungsbereich bis 10 MW

Vorteile des Vakuumeis-Verfahrens

In der Anwendung zum Wärmeentzug aus Gewässern weist die Vakuum-Flüssigeis-Technologie folgende Vorteile auf:

- ▶ Die Wärmeentzugsleistung ist unabhängig von der Wassertemperatur und somit auch bei sehr kaltem Wasser gegeben.
- ▶ Es besteht keine Verschmutzungsgefahr des Wärmeübertragers, da der Wärmeentzug durch Direktverdampfung erfolgt und es keinen seewasser-beaufschlagten Wärmeübertrager gibt. Ergebnis: Geringerer Aufwand für Filterung, Reinigung, Rückspülung, ...
- ▶ Die für die benötigte Wärmeentzugsleistung erforderliche Wassermenge ist im Vereisungsbetrieb deutlich geringer als bei konventionellen Wärmeübertrager-Systemen (Verringerung des Pumpaufwandes sowie ggf. des mengenbezogenen Wasserentnahmeentgeltes).

Neben der im Rahmen der Studie betrachteten Vakuum-Flüssigeis-Technologie existieren noch weitere Verfahren zum Wärmeentzug, die im Zusammenhang mit einer seethermischen Energienutzung eingesetzt werden können. Diese werden im folgenden Absatz zusammenfassend beschrieben.

2.2.1.2 Maxloidl-Verfahren

Hierbei wird ein im Wasser schwebendes Rohr verwendet, mitsamt einem inneren und einem äußeren Rohr (Abbildung 10). Das obere Rohrende befindet sich oberhalb der Wasseroberfläche; es wird ein hydrostatischer Druck erzeugt, wodurch das Seewasser das Innenrohr durchströmen kann. Dabei werden die im äußeren Rohr enthaltenden Wärmekollektoren über Wärmetauscher erwärmt. Die erwärmte Wärmeträgerflüssigkeit wird anschließend an eine Wärmepumpenanlage auf dem Festland geleitet. Positive Eigenschaften des Verfahrens sind eine geringere Pumpleistung und eine Förderung der Wasserzirkulation.

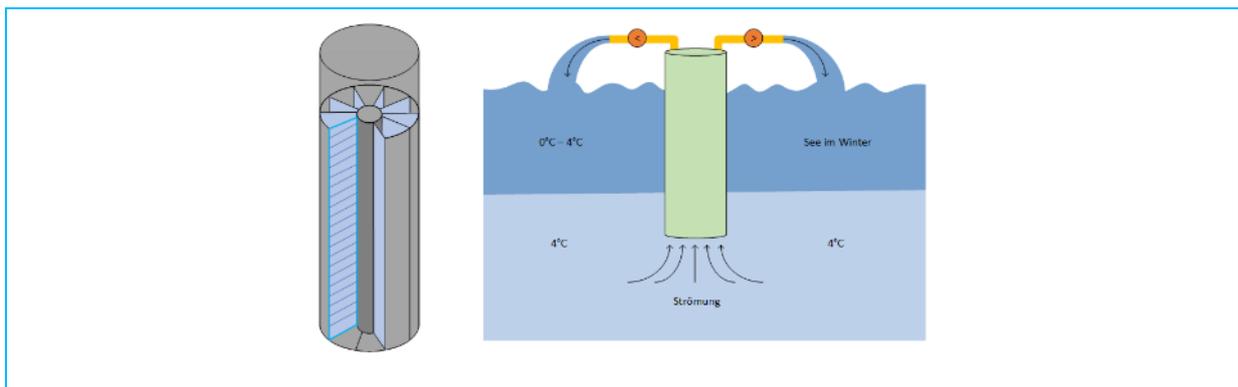


Abbildung 10: Maxloidl-Verfahren (Max Loidl 2009)

2.2.1.3 Limnion-Lima-1

Dieses Verfahren (Abbildung 11) eignet sich nur bei einer gering benötigten Wärmeleistung, zum Beispiel einzelner seenaher Häuser. Das Seewasser zirkuliert im Gerät, dabei wird die enthaltene thermische Energie über Wärmetauscher entzogen und über ein Wärmeträgermedium zur an Land befindlichen Wärmepumpe geleitet (Schwinghammer 2012).

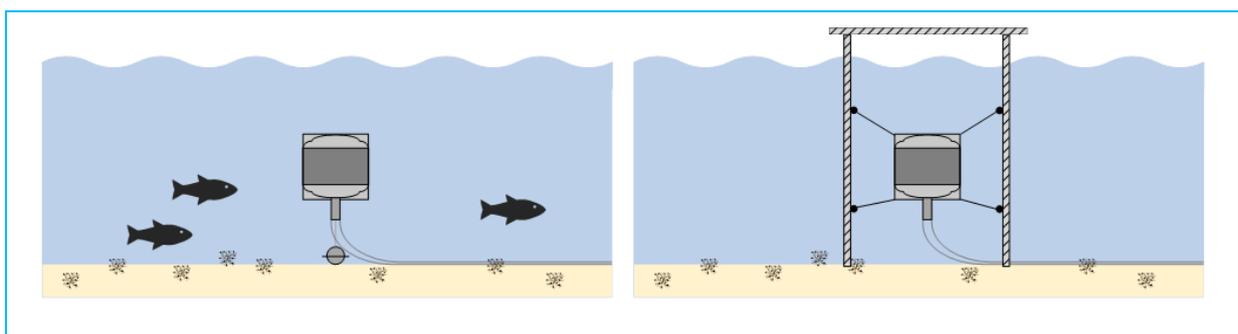


Abbildung 11: Aufbau Limnion Lima-1 (FRANK GmbH 2012)

2.2.2 Wärmetransformation/Wärmepumpe

Um die im Seewasser enthaltene thermische Energie nutzbar zu machen, ist in der Regel der Einsatz einer Wärmepumpe notwendig. Für deren Betrieb wird zusätzliche, zumeist elektrische, Energie benötigt.

Die überwiegende Mehrzahl der Wärmepumpen arbeitet nach dem Kaltdampf-Kompressionskälteprozess – einem geschlossenen, thermodynamischen Kreisprozess zwischen zwei Druckniveaus. Der verwendete Arbeitsstoff wird als Kältemittel bezeichnet.

Die Zustandsänderungen des Kältemittels können in Abbildung 12 nachvollzogen werden:

Im Verdampfer liegt das Kältemittel bei einem niedrigen Druck (Verdampfungsdruck) und der daraus resultierenden Verdampfungstemperatur vor. Die Verdampfungstemperatur des Kältemittels ist geringer als die Temperatur der Wärmequelle (Seewasser). Dadurch kann das Seewasser Wärme an das Kältemittel abgeben. Das Kältemittel verdampft und das abgekühlte Seewasser verlässt den Verdampfer.

Der Kältemitteldampf wird vom Verdichter auf ein höheres Druckniveau komprimiert und liegt dann als überhitzter Dampf bei Kondensationsdruck vor. Aus dem Kondensationsdruck resultiert die Kondensationstemperatur, die oberhalb der Heizwassertemperatur liegt. Somit kann das Kältemittel kondensieren und die dabei freiwerdende Kondensationswärme an das Heizungswasser abgeben. Dieser Prozess findet im Kondensator/Verflüssiger statt.

Nach dem Kondensator liegt das Kältemittel in flüssiger Phase vor und strömt durch ein Expansionsorgan erneut zum Verdampfer. Das Expansionsorgan reduziert den Druck des Kältemittels auf Verdampfungsdruckniveau.

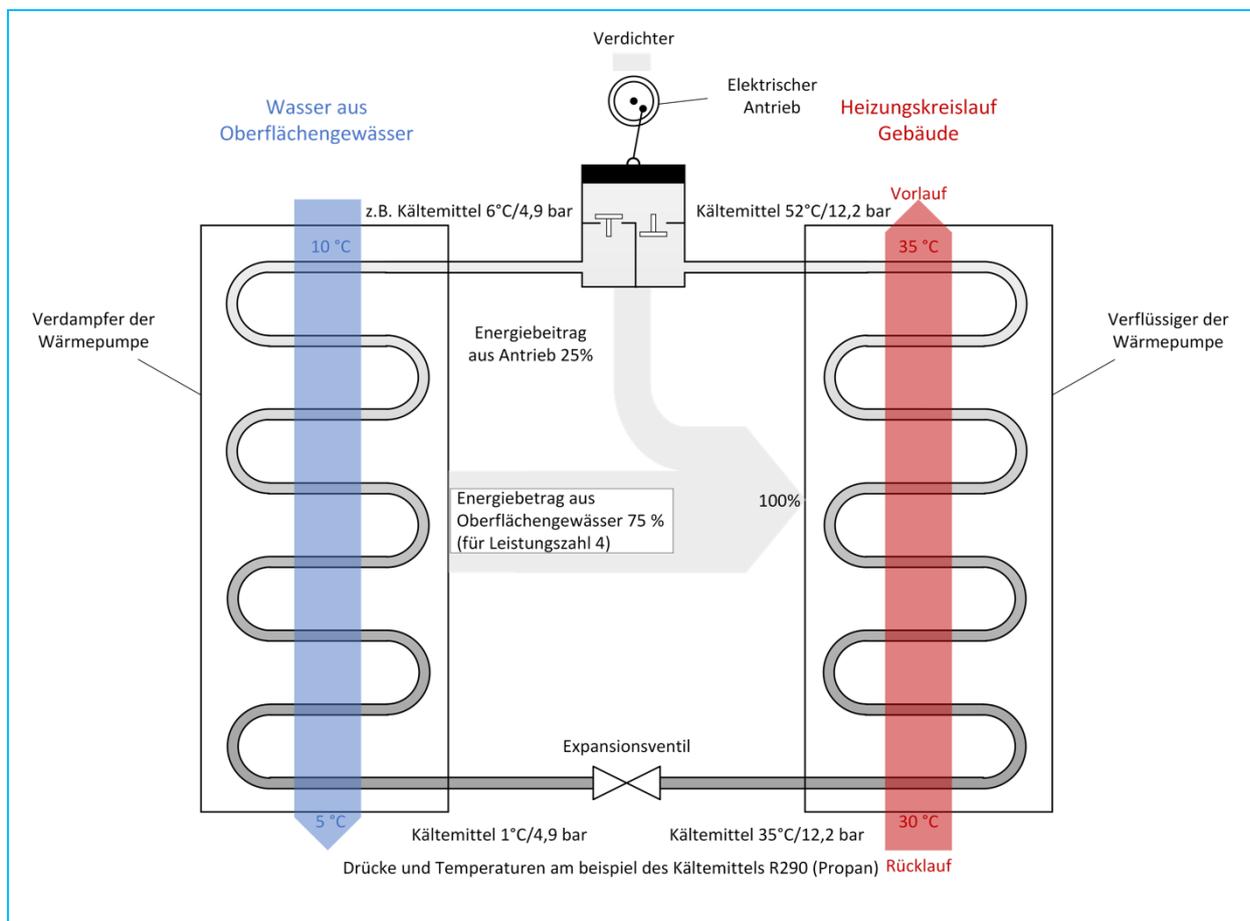


Abbildung 12: Funktionsweise einer Wärmepumpe (Schwinghammer 2012)

Wichtige Effizienzkenngößen sind die Leistungszahl (engl. COP-Coefficient of Performance oder EER-Energy Efficiency Ratio) sowie die Jahresarbeitszahl (SEER-Seasonal Energy Efficiency Ratio).

Die Leistungszahl ist das Verhältnis der von der Wärmepumpe abgegebenen Wärmeleistung zur aufgenommenen elektrischen Leistung (Momentanwerte).

Die Jahresarbeitszahl ist das Verhältnis der im Jahresverlauf erzeugten Wärme(menge) zur eingesetzten elektrischen Energie und berücksichtigt somit unterschiedliche Betriebszustände der Wärmepumpe.

Beim Vergleich derartiger Kenngößen für verschiedene Anlagen oder Systeme ist die Bilanzgrenze zu beachten, d.h. ob jeweils nur die Antriebsenergie für den Verdichter der Wärmepumpe oder auch Nebenverbräuche, z.B. für den Betrieb von Pumpen etc., berücksichtigt wurden.

Wichtigster Einflussfaktor auf die Effizienz ist der von der Wärmepumpe zu erbringende Temperaturhub, also die Differenz aus Kondensationstemperatur (Wärmeabgabe) und Verdampfungstemperatur (Wärmeaufnahme) des Kältemittels.

Der Kühlprozess verläuft nahezu identisch. Einziger Unterschied ist, dass die Kreisläufe umgedreht werden. Das zu kühlende Wasser gibt seine Wärmeenergie am Verdampfer ab, während diese am Kondensator dem Seewasser wieder zugeführt wird (Abbildung 13).

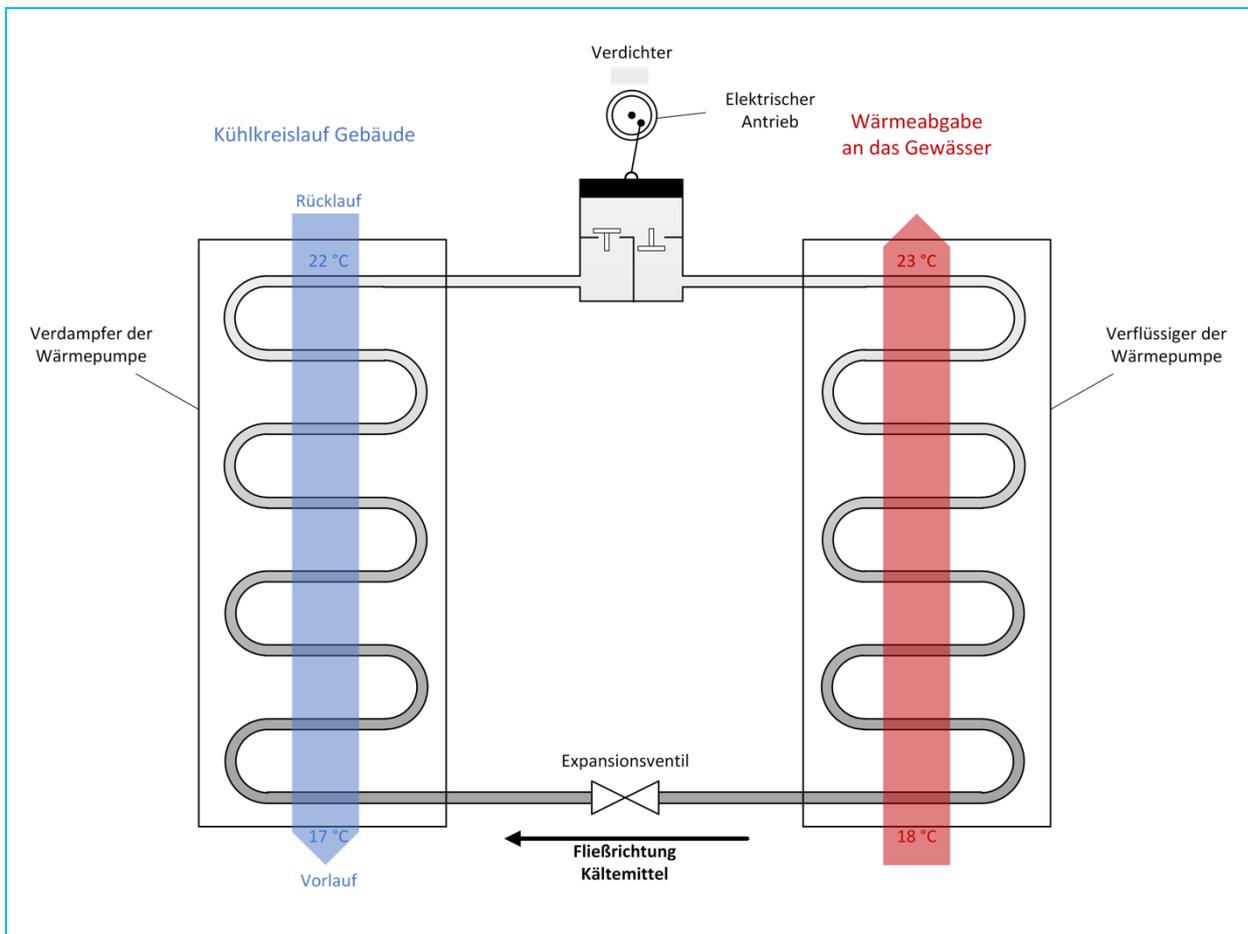


Abbildung 13: Aufbau des Energiekreislaufes beim Kühlprozess (Schwinghammer 2012)

Der elektrische Aufwand kann durch erhöhte Quelltemperaturen (deutsche Seen sind z.B. im Jahresdurchschnitt viel wärmer als Grundwasser, Erde oder Luft) drastisch verbessert werden. So bewirkt jedes Grad höhere Quelltemperatur ca. 2,5 % weniger elektrische Energie. Die Systemjahresarbeitszahl (das Verhältnis von elektrischem Aufwand zu erzeugter Nutzwärme - SJAZ) steigt bei durchschnittlich 10 °C höherer Quelltemperatur von 4 auf 6. Damit können mit 1 kWh elektrischer Energie 6 kWh Wärmeenergie zur Verfügung gestellt werden, worauf die Hoffnungen dieses Seethermie-Projekts ruhen.

Durch die bedarfsgerechte, ‚intelligente‘ Betriebsführung werden im kalten Wärmenetz nennenswerte Verluste vermieden. Das Wärmenetz muss in Zeiten ohne nennenswerten Bedarf nicht betrieben werden.

Zudem steigt der Nutzen im Verhältnis zum Aufwand, wenn das System moderne Verteilnetze versorgen darf. Decken-, Wand- oder Fußbodenheizungssysteme wirken (wie die höheren Quelltemperaturen) sehr positiv mit ihren deutlich niedrigeren Zieltemperaturen auf die Systemjahresarbeitszahl. Augenblicklich werden solche Verteilnetze überwiegend beim Neubau von Gebäudekomplexen oder Quartieren installiert; zukünftig muss dies auch im Bestand im Rahmen der Sanierungswellen möglich sein.

Technisch kann eine Leistungszahl von 9,5 erreicht werden, wenn 30-gradige Abwärme (Anergie - in einem Prozess nicht nutzbare Energie) auf 40 °C zur Versorgung von Flächenheizungen gehoben wird.

Zudem können diese neuen Netzformen (siehe Anlage 1: Übersicht Wärmenetze) über ihre Reversibilität auch zu sommerlicher Kühlung herangezogen werden.

Die beschriebenen Möglichkeiten eröffnen vor allem bei insgesamt sinkendem Energieverbrauch neue Geschäftsfelder für Energieversorger, wie Stadtwerke oder Energiegenossenschaften, und können die Wärmeversorgung nachhaltig, umweltgerecht und wertschöpfend sicherstellen.

2.3 Ökologie

Ob und inwieweit Temperaturveränderungen im See durch die energetische Nutzung von Seewasser entstehen, ist abhängig von der entnommenen Wassermenge, der Größe des Sees, der Entnahme- und Rückleitungstiefe sowie der Temperaturdifferenz zwischen Entnahme- und Rückleitungswasser. Bisherige Forschungsergebnisse sowie Erfahrungen aus der Schweiz zeigen, dass ökologische Auswirkungen bei einer guten Konzeptionierung und einem guten Management minimal sind. Dennoch müssen mögliche Folgen bei der Errichtung einer Seethermie-Anlage zwingend berücksichtigt werden, insbesondere die eines möglichen Wassertemperaturanstieges. Dieser könnte das Wachstum von Phytoplankton und Algen begünstigen und so eine Eutrophierung des Sees fördern. Gleiches gilt für den Eintrag nährstoffreichen Tiefenwassers in oberflächennahe Schichten des Sees (Gaudard et al. 2018a).

Auf den ganzen See bezogen sind die Temperaturveränderungen, je nach Abflussmenge und -temperatur sowie der Größe des Sees, als gering einzustufen. Dennoch besteht die Gefahr, dass es lokal, durch das Herausbilden einer Abflussfahne, zu deutlichen Tempe-

raturveränderungen kommen kann (Abbildung 15). Um das zu verhindern, kann das Wasser in Schichten mit erhöhter Zirkulation eingeleitet werden. Zusätzlich dazu lässt sich die Größe der Abgabefahne über die Einleitgeschwindigkeit und den Einleitwinkel beeinflussen (Gaudard et al. 2018b).

Je nach Größe des Sees kann die natürliche Schichtung bei zu großen Temperaturdifferenzen zwischen der Wassertemperatur im Bereich der Einleitungsstelle und der des eingeleiteten Wassers beeinflusst werden. Insbesondere bei kleinen Seen mit geringen Wassermengen könnten die Abgabefahnen zur Störung der Durchmischungsprozesse führen und das Schichtungsverhalten verändern (Kammer et al. 2015). Gleichzeitig lässt sich die Durchmischung fördern, indem kaltes oder warmes Wasser in bestimmte Tiefen eingeleitet wird (Kammer et al. 2015).

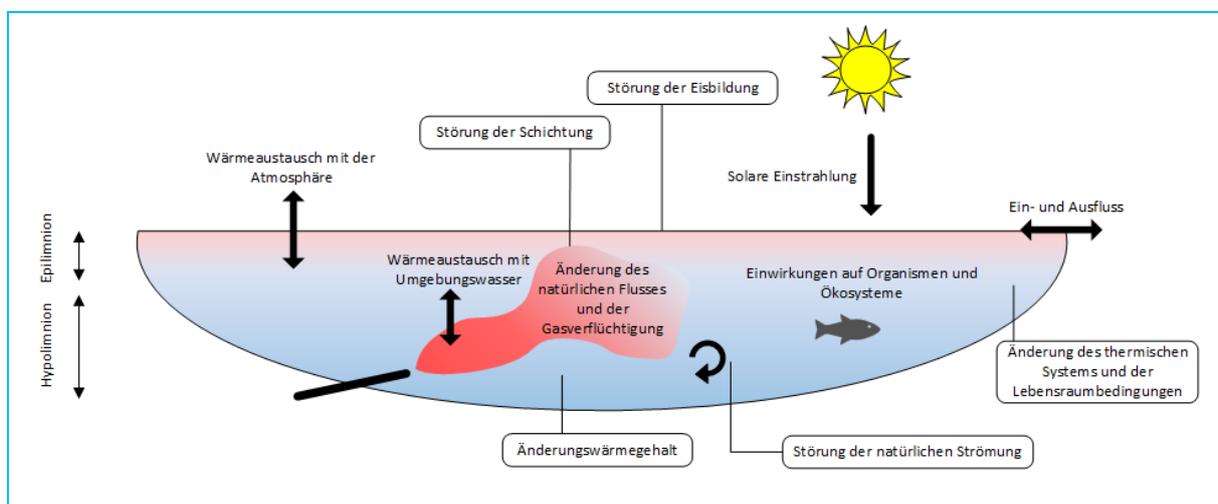


Abbildung 15: Einflussfaktoren und Auswirkungen der Tiefeneinleitung von wärmerem Wasser auf ein Seeökosystem (Gaudard et al. 2018b)

Besonders Fische sind anfällig für Temperaturveränderungen (Abbildung 16), da sie an bestimmte Temperaturbereiche angepasst sind, in denen sie leben können (Abbildung 17). Jede Art besitzt hierbei eigene Bereichsgrenzen, welche sich nach dem Entwicklungsstadium, der Jahreszeit und der Sauerstoffverfügbarkeit richten (Gaudard et al. 2017). Außerhalb dieser Bereiche stehen sie unter starkem Stress und können verenden (Abbildung 17).

Zudem steigt ihre Anfälligkeit für Krankheiten mit einer höheren Temperatur (Gaudard et al. 2018b). Arten mit einer höheren natürlichen Temperaturtoleranz würden durch etwaige Veränderungen begünstigt werden.

Eine Nährstoffverlagerung durch die Einleitung nährstoffreichen Tiefenwassers in den oberflächennahen Wasserkörper könnte zu biologischen Veränderungen führen. Bei sessilen Algen und beim Phytoplankton könnte das Überangebot an Nährstoffen zu einem starken Wachstum führen, mit Folgen für die Wasserqualität (Gaudard et al. 2018b). Jedoch sind auch positive Rückkopplungen möglich; so ließe sich die Wasserqualität über den Eintrag von Sauerstoff in sauerstofffreie Seebereiche steigern. Eine ausreichende Kenntnis über den Nährstoffhaushalt und die Ökologie des Sees ist demnach neben der Wasserchemie sehr wichtig, um die Art und Weise der Entnahme festlegen zu können.

Neben den möglichen Auswirkungen auf die Temperatur- und Nährstoffverhältnisse des Sees durch die thermische Nutzung ist schon beim Bau auf ein umweltschonendes Vorgehen zu achten. Die Flachwasserzone des Uferbereiches ist wegen ihrer Habitat- und Artenvielfalt von großer ökologischer Bedeutung. Um die Beeinträchtigung dieser Funktion in Folge einer Bebauung zu minimieren, wird zur Anwendung eines Spülbohrverfahrens bei der Verlegung der Rohrleitungen geraten (Kammer et al. 2015).

Es bleibt festzuhalten, dass die ökologischen Folgen bei einer seeangepassten Wahl der Entnahmeparameter auf ein Minimum reduziert werden können.

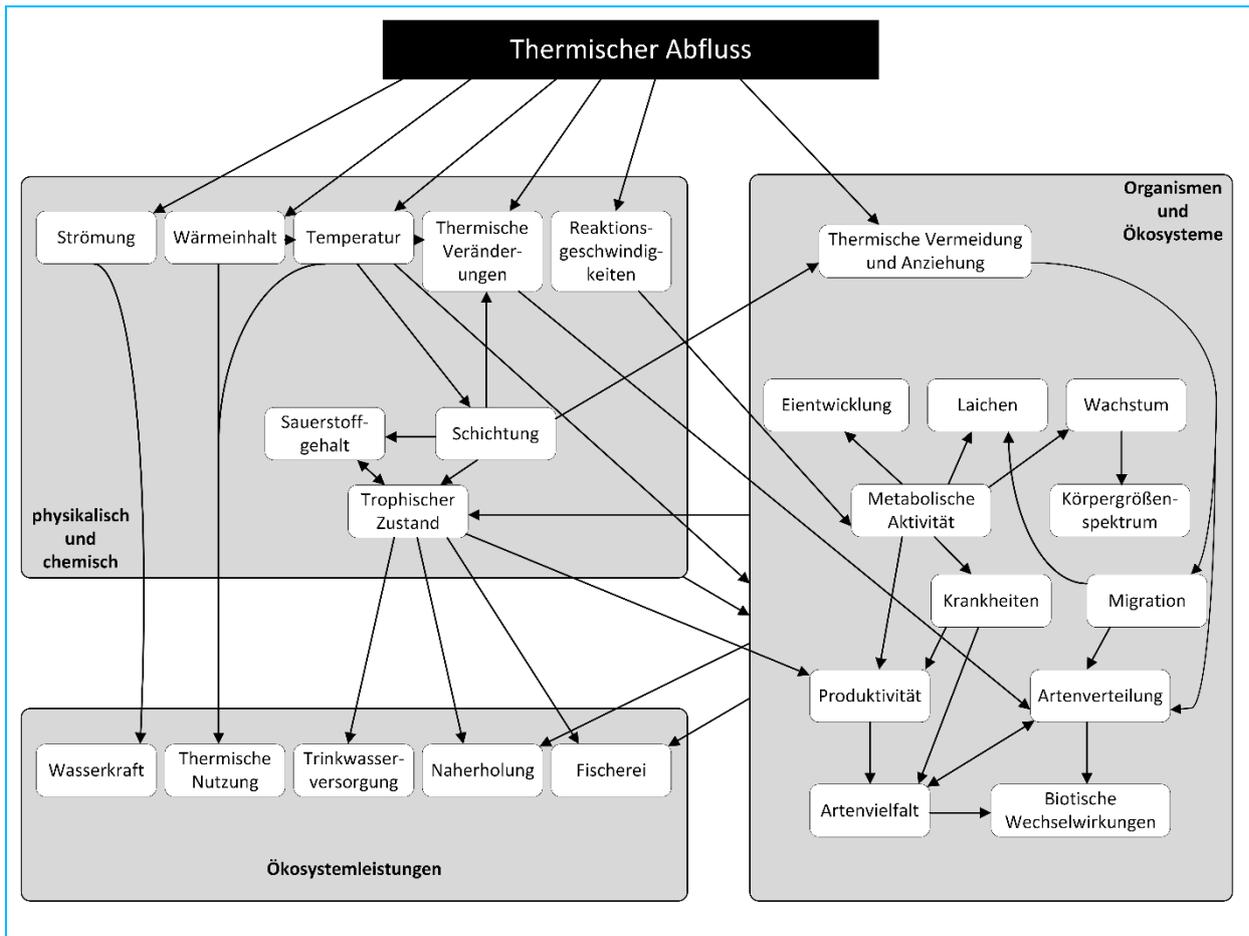


Abbildung 16: Konzeptionelles Modell für die Auswirkungen thermischer Seeenergienutzung (Gaudard et al. 2018b)

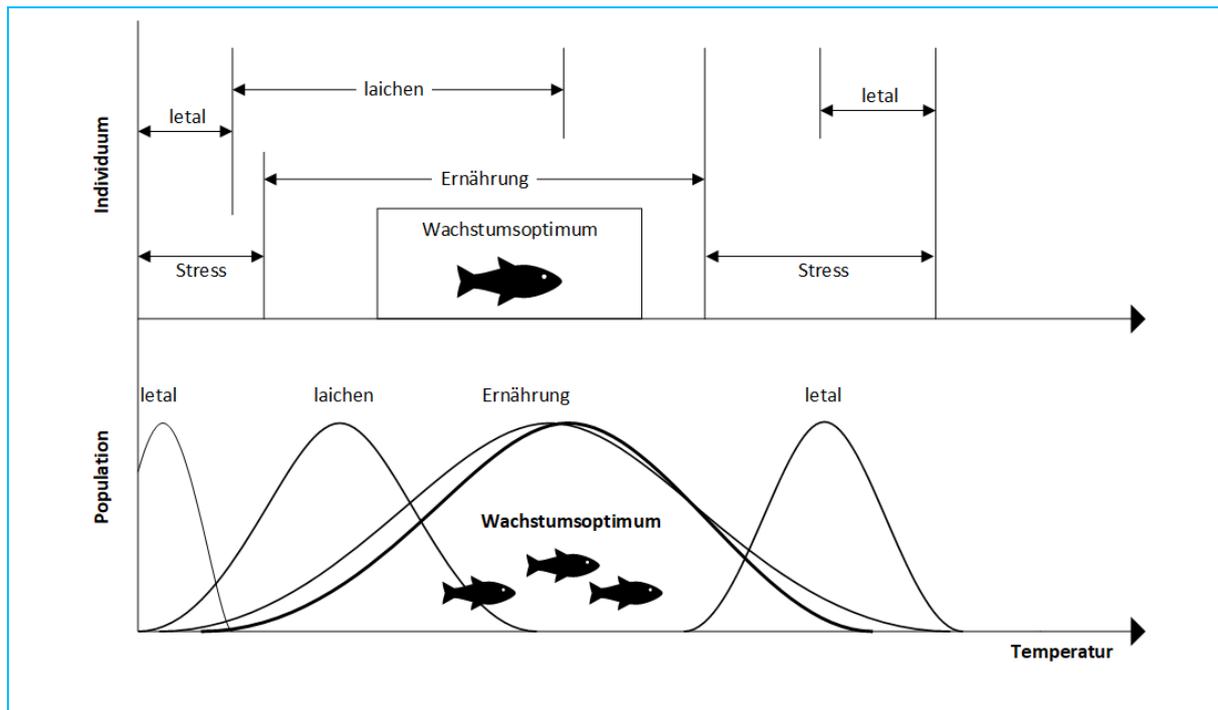


Abbildung 17: Physiologische Anpassungen von Fischen an bestimmte Temperaturbereiche (Gaudard et al. 2018b)

2.4 Forschungsergebnisse & -bedarf

2.4.1 Entnahme- und Abgabetiefe

Für ein besseres Verständnis ist vorab zu erwähnen, dass bei der thermischen Seewassernutzung im Winter tendenziell eine Gewässerabkühlung durch die Heiznutzung und im Sommer tendenziell eine Erwärmung durch die Kühlnutzung erfolgt (Abbildung 12 und Abbildung 13). Die ist allerdings stark abhängig vom Umfang der Wärmeentnahme bzw. -zufuhr.

In (Fink et al. 2014) werden drei verschiedene Entnahme- und Abflusstiefen und ihr Einfluss auf die Oberflächentemperatur am Beispiel des Bodensees modelliert. Hierfür wurde das horizontal gemittelte 1D-Simstrat-Modell mit einer vertikalen Auflösung von 1 m verwendet. Dazu wurden sechs Szenarien erstellt (Abbildung 18). In verschiedenen Szenarien wurden die Wassertemperatur bei der Entnahme und die Entnahmemenge variiert. Die maximale Entnahmemenge betrug jeweils $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Ergebnisse repräsentieren die Temperaturveränderungen einer Tiefenstufe des gesamten Bodensees. Für keines der Szenarien wurden Temperaturveränderungen höher als $0,2 \text{ K}$ ermittelt⁵. Erfolgt sowohl eine Wärme- als auch eine Kühlnutzung, schwanken die Temperaturen nur um maximal $0,1 \text{ K}$. Besonders gering waren die Veränderungen an der Seeoberfläche (Fink et al. 2014).

⁵ Die Angabe bezieht sich einsprechend eines horizontal gemittelten 1D-Modell auf die mittlere Temperaturänderung einer Tiefenstufe des gesamten Bodensees.

Gleiches gilt für die Dauer der sommerlichen Stagnationsperiode des Sees. Diese veränderte sich je nach Szenario selbst bei unrealistischen Wärmeentnahme- und Abgabewerten größer 1 GW bzw. - 1 GW nur um wenige Tage.

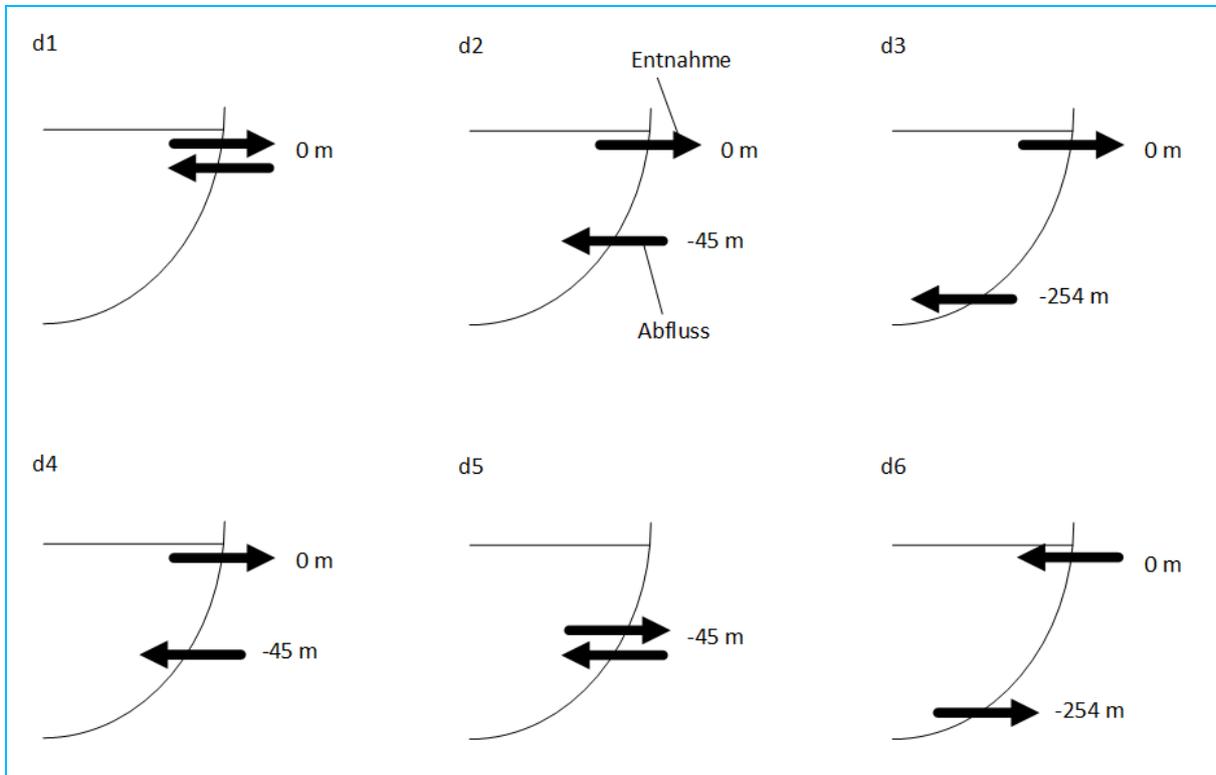


Abbildung 18: Sechs verschiedene Entnahmetiefen des Simstratmodells für den Bodensee (Fink et al. 2014)

Eine Veränderung der Wasserzirkulation konnte ebenfalls nicht festgestellt werden. In den Modellierungen von (Fink et al. 2014) werden ökologische Parameter außer Acht gelassen und lediglich die horizontal gemittelte Temperatur berücksichtigt. Zudem lassen sich die Vorhersagen nur bedingt verallgemeinern, da individuelle Charakteristika eines Sees, wie Tiefe, Fläche, Wasservolumen und Schichtung, entscheidende Einflussfaktoren sind. So ist der Bodensee ein sehr tiefer alpiner See, welcher nicht vergleichbar mit den Seen Mitteldeutschlands ist. Folglich ist eine seespezifische Modellierung notwendig, welche in Kapitel 5 dargestellt ist.

Klimawandel

In (Fink et al. 2014) wurden des Weiteren die Temperaturerhöhungen des Bodensees im Zuge des Klimawandels berücksichtigt. Dazu wurden vier Klimaszenarien in das Simstratmodell integriert (Abbildung 19). Bei einer Wärmeentzugsleistung von 0 GW würde die Wassertemperatur in allen Tiefen steigen. Über eine Erhöhung der Wärme-Entzugsleistung ließe sich dieser Effekt abschwächen (Fink et al. 2014). Um eine Erwärmung des Oberflächenwassers durch den Klimawandel sowie die sommerliche Kühlnutzung zu unterbinden, besteht die Möglichkeit, kaltes Tiefenwasser zu entnehmen und es nach der thermischen Nutzung dem Oberflächenwasser zuzuführen. Das würde folglich gekühlt werden; hierbei ist jedoch die angesprochene Nährstoffverlagerung von Bedeutung. Zu-

dem ließe sich über eine, im Vergleich zur sommerlichen Kühlnutzung, höhere Wärmenutzung im Winter der klimatische Temperaturanstieg durch den Wärmeentzug abmildern.

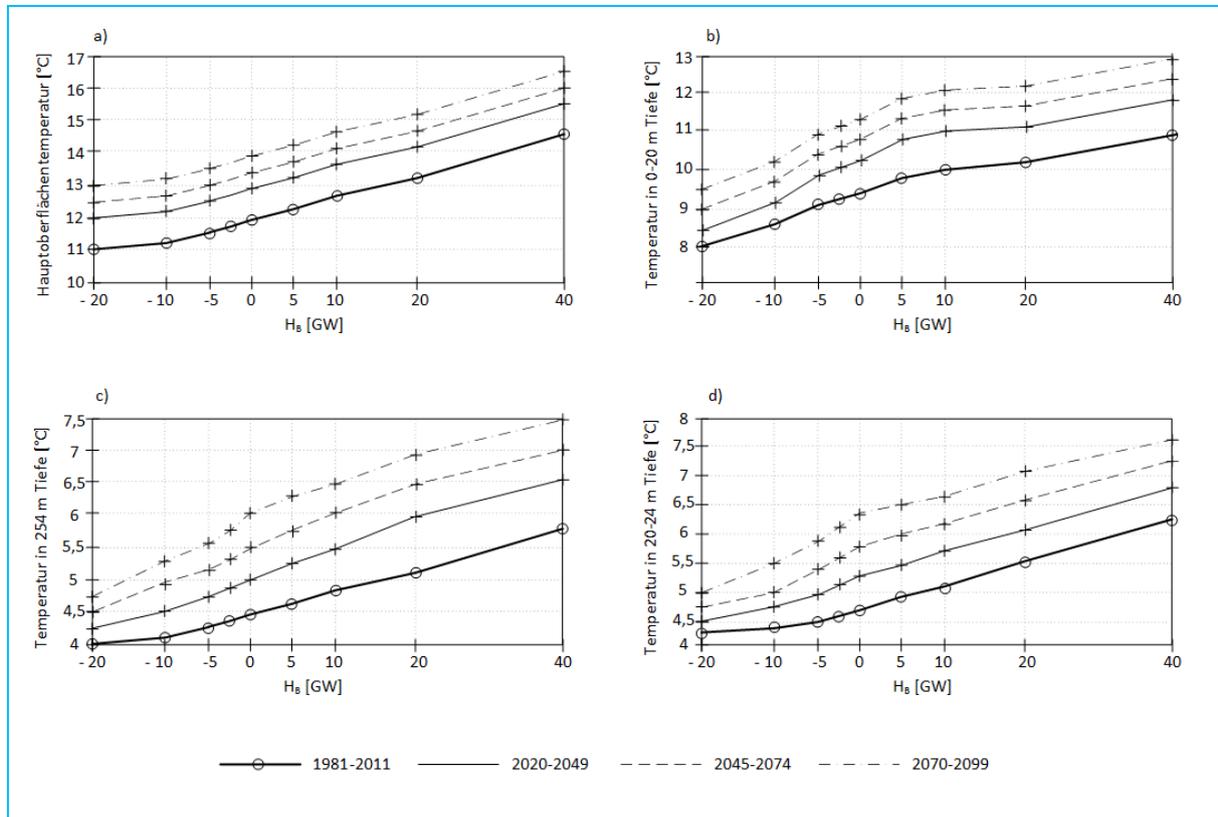


Abbildung 19: Auswirkungen des Klimawandels und der Wärmeentzugsleistung (HE) auf die Wassertemperatur in verschiedenen Seetiefen (Fink et al. 2014)

2.4.2 Forschungsbedarf

erheblicher Forschungsbedarf besteht in Bezug auf die individuellen Seewassereigenschaften, wie Wasservolumen, Wassertiefe und Wasserschichtung, und welche Auswirkungen eine thermische Seewassernutzung auf diese Eigenschaften haben könnte.

Letztendlich geht es um eine interdisziplinäre Systemforschung im Spannungsfeld Morphometrie - Ökologie - Klimawandel zur energetischen Nutzung bis hin zu deren Wirtschaftlichkeit. Besonders für Deutschland steht hier die Lernkurve noch weit am Anfang (Kammer et al. 2015). Hinzu kommt die Berücksichtigung der Bedingungen der Bergbaufolgen am exemplarischen Standort.

Anders ist das in der Schweiz, wo Seethermie bereits einen wichtigen Beitrag zur Energieversorgung leistet. Die alpinen Seen der Schweiz unterscheiden sich jedoch morphologisch sehr von deutschen Seen des Flachlands. Besonders für flache Seen liegen keine belastbaren Daten für die thermische Nutzung vor.

2.5 Beispielprojekte

2.5.1 Rathaus Zürich

1938 wurde im Züricher Rathaus die weltweit erste Wärmepumpe installiert (Schwinghammer 2012). Betrieben wurde sie mithilfe thermischer Energie aus dem Fluss Limmat, welcher unterhalb des Rathauses fließt. Der Aufbau der Wärmepumpe ähnelte dem einer heutigen sehr.

Bereits damals nutzte man einen Verdampfer, einen Kompressor und einen Verflüssiger (Abbildung 20). Anstatt der oft verwendeten Plattenkollektoren im Wärmetauscher wurden Rohrbündelwärmetauscher verwendet. Zur Absicherung von Spitzenlasten und für Notfälle wurde zusätzlich eine Elektroheizung installiert. Die Anlage konnte sowohl Heizen als auch Kühlen. 2001 wurde die Anlage durch eine modernere ausgetauscht.

Technische Daten der alten Anlage:

- ▶ Minimale Eintrittstemperatur: 6 °C
- ▶ Entnahmerate: 28 m³/h bzw. 8,1 l/s
- ▶ Vorlauftemperatur nach Kompression: 48 °C
- ▶ Heizleistung: 66 kW
- ▶ Kühlleistung: 61 kW

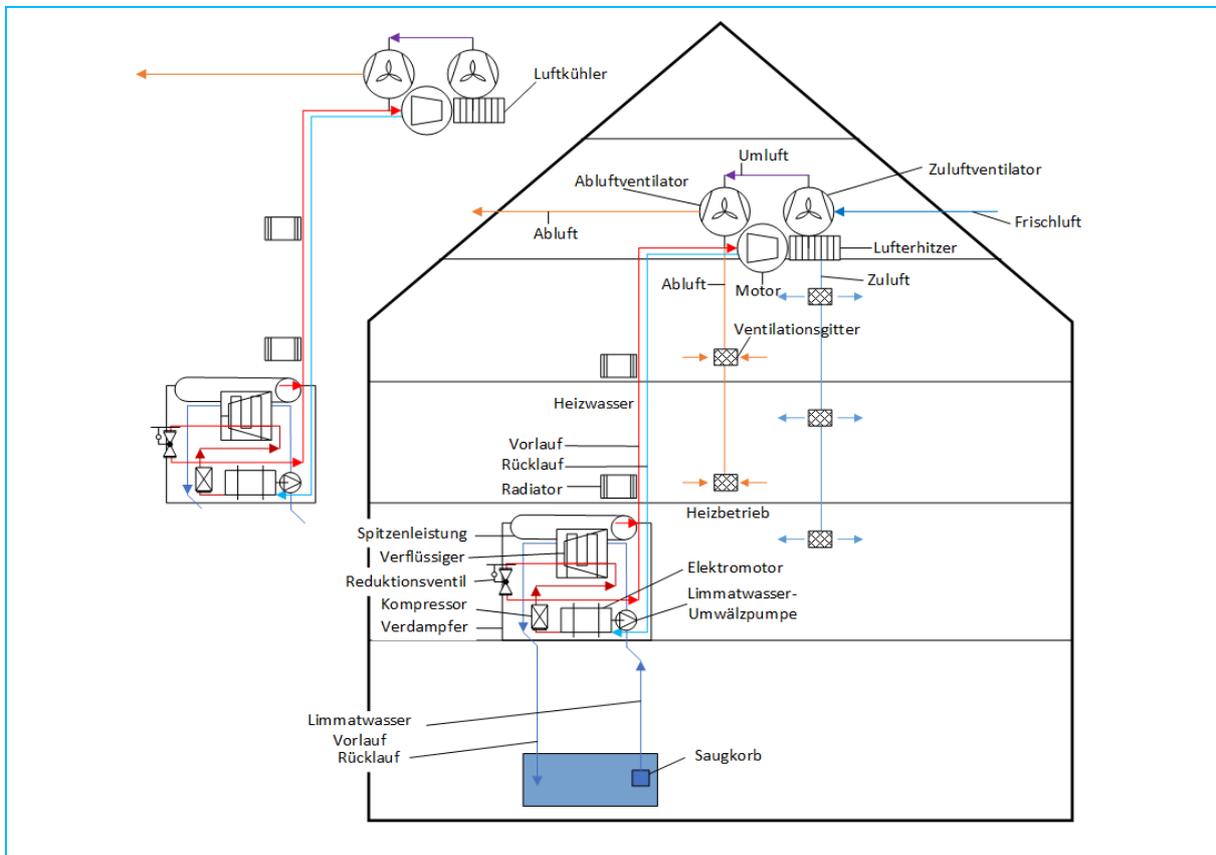


Abbildung 20: Schemaskizze der Wärmepumpenanlage im Rathaus Zürich aus 1938 (Schwinghammer 2012)

2.5.2 Campingplatz Laacher See

Am Laacher See in Deutschland wird seit 2007 das Verwaltungsgebäude des gleichnamigen Campingplatzes mit Seethermie versorgt. Die Wasserentnahme erfolgt über eine unterirdische Leitung, welche das Seewasser über einen Brunnenschacht dem Heizkeller des Gebäudes zuführt. An der Entnahmestelle befindet sich ein zurückspülbarer Filter, welcher die Reinigung der Filterschlitzte ermöglicht. Im Heizkeller wird die Wärme auf einen Zwischenkreislauf, mit Sole als Wärmeleitmedium, übertragen, bevor sie anschließend einer Wasser-Wärmepumpe zugeführt wird. Um eine Verunreinigung der Leitungen zu verhindern, wird das Wasser einmal wöchentlich mit Heizstäben auf 75 °C erhitzt. Zusätzlich wird die Abwärme von Kühlaggregaten zur Trinkwassererwärmung genutzt.

Technische Daten:

- ▶ Entnahmetiefe: 12 m (ganzjährig 6 - 10 °C, geringer Algenbewuchs)
- ▶ Entnahmestelle: 50 m vom Ufer entfernt
- ▶ Wasserentnahmerate: 24 m³/h bzw. 6,7 l/s
- ▶ Vorlauftemperatur der Wärmepumpe nach Verdichtung: 60 °C
- ▶ Gesamtheizleistung: 100 kW (bei 10 °C Eintrittstemperatur: 120 kW)

2.5.3 Spital Männedorf am Züricher See

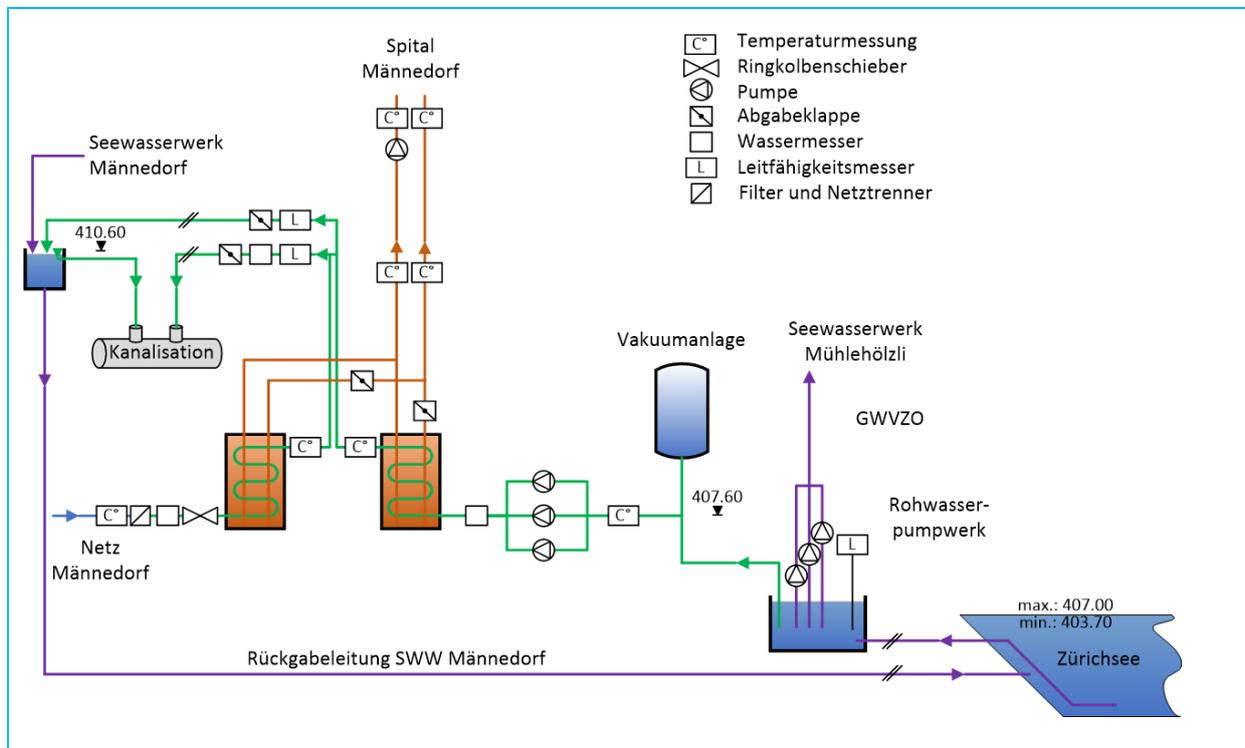


Abbildung 21: Schema der Energienutzung des Spitals Männedorf (Stocker und Abt 2012)

Seit 2012 wird das Spital Männedorf (Abbildung 21) am Züricher See mit thermischer Seeenergie versorgt.

Über ein Rohwasserpumpwerk wird das Wasser zur Wärmepumpenanlage geleitet. Diese besteht aus drei unterschiedlich großen Wärmepumpen, die je nach Bedarf aktiviert werden können. Die kleine Pumpe kann Bedarfsmengen von 30 – 100 m³/h abdecken. Eine große Pumpe kann im Einzellauf 70 – 170 m³/h fördern; wird zusätzlich dazu die zweite große Pumpe im Parallellauf geschaltet, können sogar Bedarfsmengen von 150 – 230 m³/h abgedeckt werden (Stocker und Abt 2012). Die benötigte Wassermenge wird mithilfe eines Ringkolbenschiebers reguliert. Die Wärmetauscher bestehen aus 306 einzelnen Plattenkollektoren mit einer Gesamtfläche von 304 m². Bei einer maximalen Bedarfsmenge von 230 m³/h und einer Temperaturentnahme von 3 K kann eine Leistung von 800 kW erbracht werden. Einmal im Monat werden die Leitungen durch eine Stoßchlorierung gereinigt. Die Kosten der Anlage beliefen sich auf 1,3 Mio. Franken (1,2 Mio €) (Stocker und Abt 2012).

2.5.4 Circulago am Zugersee

Hinter Circulago versteckt sich das ambitionierte Projekt, bis zum Jahr 2040 die Stadt Zug und den südlichen Teil der Nachbarstadt Baar mit klimaneutraler Wärme- und Kälteenergie aus dem anliegenden Zugersee zu versorgen (Abbildung 22). Innerhalb des Gebietes leben circa 30.000 – 35.000 Menschen.



Abbildung 22: Gebiet Zug (Stadt) und Baar-Süd, Versorgung des gesamten Gebiets bis 2040 geplant. Die farblich abgegrenzten Bereiche stellen die Quartiere dar (Tschan und Watts 2018)

Der Ausbau der Anlage und der Anschluss der Gebäude sollen etappenweise erfolgen. Man rechnet mit einer CO₂-Ausstoßsenkung von 80 % (Tschan und Watts 2018). Für die notwendigen Leitungen ist geplant, ein 2,8 km langes Tunnelsystem durch das sogenannte Microtunneling, einem Rohrvortriebsverfahren, anzulegen (Abbildung 23) (Tschan und Watts 2018).



Abbildung 23: Links: der Vortriebsbohrer Isabelle. Rechts: Einbau des Bohrers im Startschacht (Tschan und Watts 2018)

Das Seewasser wird aus einer Tiefe von 26 m, rund 400 m vom Ufer entfernt, gewonnen und in die Seewasserzentrale an Land gepumpt. Die Tiefe wurde aufgrund der dortigen konstanten Wassertemperaturen von 4 – 8 °C gewählt (Abbildung 24) (Tschan und Watts 2018).

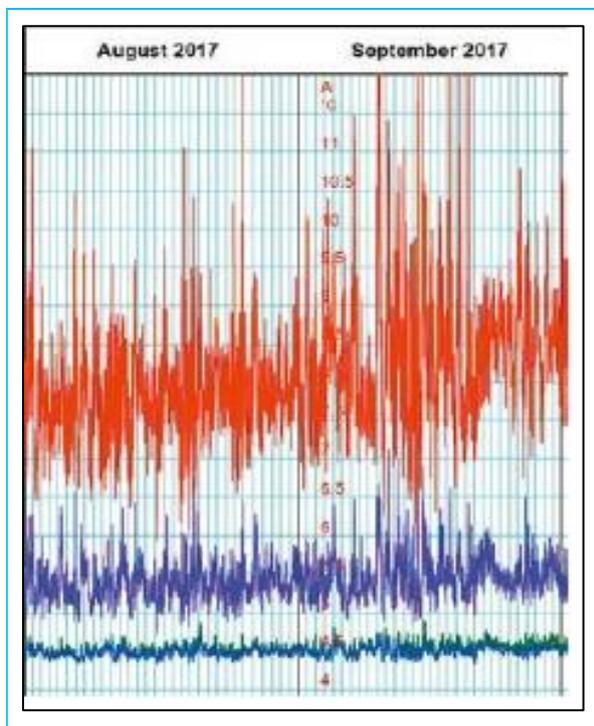


Abbildung 24: Temperaturprofile der unterschiedlichen Tiefen des Zugersees: rot = 15 m; lila = 20 m; blau = 28 m; grün = 30 m (Tschan und Watts 2018)

In der Seewasser-Übergabe-Station (SÜS) wird die thermische Energie des Seewassers über Wärmetauscher auf ein kaltes Fernwärmeleitungsnetz übertragen. In diesem Zwischenkreislauf wird als Wärmeleitmedium ein Frostschutz-Gemisch verwendet.

Die Seewasser- und Fernwärmeleitungen sind hierbei hydraulisch voneinander getrennt. Nach der Wärmeabgabe wird das Wasser 290 m vor dem Ufer, 2,5 m über dem Grund wieder in den See zurückgeführt. Das in der Seewasserzentrale erwärmte Leitmedium wird durch vier Pumpen zu den einzelnen Energiezentren der Quartiere geleitet. Dort erhöhen industrielle Großpumpen die Temperatur des Leitmediums auf 70 °C. Über Wärmetauscher wird diese Energie an die gebäudeeigenen Heizsysteme übertragen (Abbildung 25). Die Großpumpen erbringen eine Erzeugerleistung von 1 – 1,5 MW.

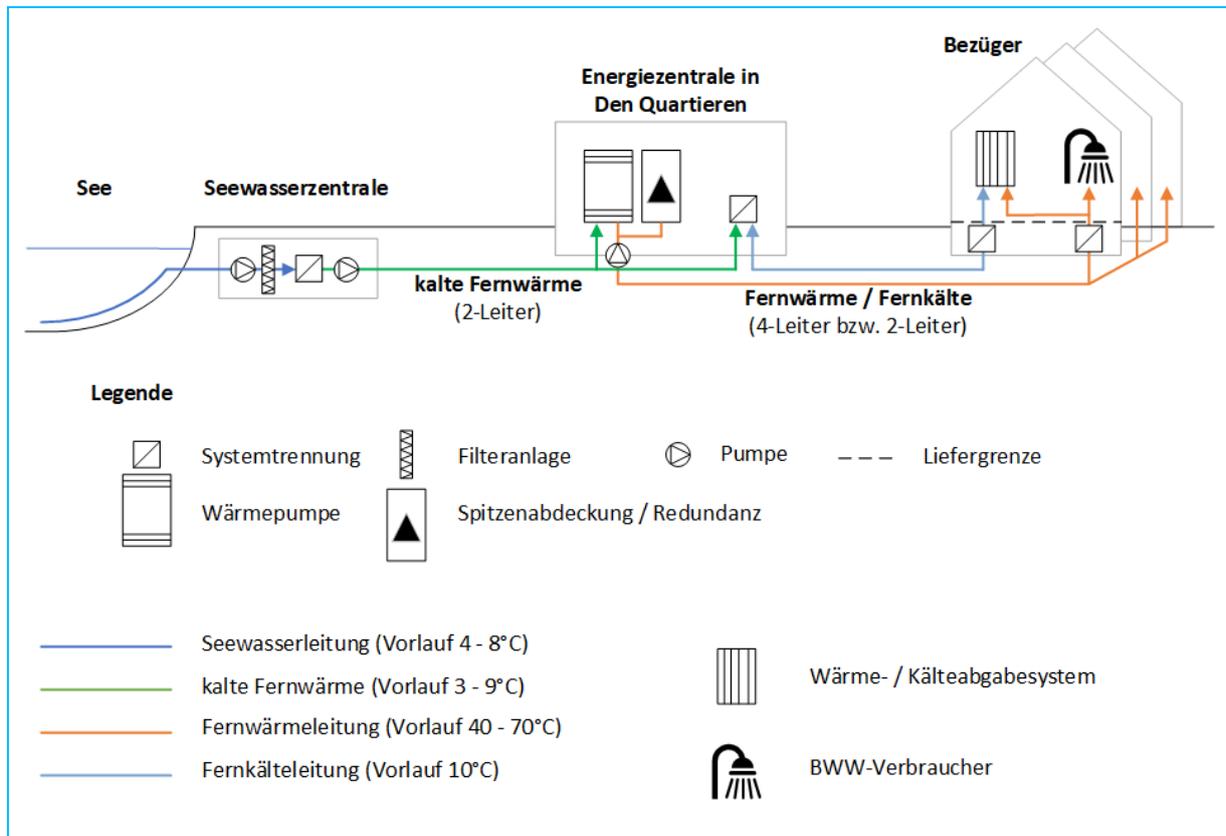


Abbildung 25: Funktionsprinzip von Circulago (Tschan und Watts 2018)

Um Spitzenlasten der Energieversorgung abzudecken, werden in den Quartieren zusätzliche Erdgas/Biogas-Heizungen eingebaut.

Die Kühlung der Gebäude erfolgt passiv. Das heißt: Die Kälte im Zwischenkreislauf (Vorlauftemperatur: 10 °C) wird in den Quartierzentren über Wärmetauscher direkt an die Gebäudesysteme übertragen (Tschan und Watts 2018).

2.5.5 Wärmepumpenanlage Walche ETH Zürich

Das Heizkraftwerk Walche versorgt rund 52 % der Gebäude der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich mit Wärme. Zusätzlich dazu ist es an ein Nahwärmenetz der Stadt Zürich angeschlossen und speist dieses mit überschüssiger Wärmeenergie (Schwinghammer 2012). Die Wärme stammt hierbei aus dem Fluss Limnat.

Eine Herausforderung für die Anlage ist die niedrige Flusstemperatur. Durch den Einbau eines speziellen großflächigen Verdampfers ist die Wärmepumpe auch bei bis zu 1,9 °C Flusstemperatur funktionsfähig. Ein weiteres Problem ist der Eintrag von Organismen ins Leitungssystem. Die im Fluss heimische Wandermuschel gelangt in die Leitungen und setzt sich an den Rohren fest; dies wird mit einer regelmäßigen Druckluftreinigung der Rohre verhindert. Um die Sedimentation von Feinschlämmen und Muschellarven zu unterbinden, wurde eine automatische Rohrreinigungsanlage mitsamt eines selbstreinigenden Kugelfilters installiert (Schwinghammer 2012).

Tabelle 1: Technische Daten Wärmepumpenanlage Walche (Schwinghammer 2012)

| | summiert für zwei Wärmepumpen | |
|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| | Nennwerten | max. Betriebsdaten |
| Heizung [MW] | 10 | 13,4 |
| Heizwasser-Vorlauftemperatur [°C] | 70 | 72 |
| Limnatwassertemperatur [°C] | 3,5 | 15 |
| Limnatwassermenge [m ³ /h] | 8640 | 8640 |
| Wärmeentzug aus Limnat [MW] | 7,04 | 9,43 |
| WP-Motorleistung [kW] | 3240 | 3950 |
| Jahresarbeitszahl [-] | 3,08 | 3,38 |
| Kältemittel | | R134A |
| Heizwassermenge [m ³ /h] | | 215 |

2.6 Fazit

Die Nutzung von Seethermie weist ein großes Potenzial auf. Insbesondere vor dem Hintergrund der Erforderlichkeit des Umstiegs auf ‚Grüne Wärme‘ als eine gesellschaftliche Antwort auf den Klimawandel, aber auch in der Prognose einer wachsenden Konkurrenzfähigkeit angesichts der CO₂-Bepreisung und der verbesserten Wirtschaftlichkeit beteiligter Technologien ist der Seethermie gerade in Regionen mit großer Verbreitung von Oberflächengewässern eine Zukunftsfähigkeit einzuräumen.

Seethermie wird auch in solchen Regionen wie andere erneuerbare Energien nicht allein die künftige Versorgung übernehmen, aber zu einem zu optimierenden Mix spürbar beitragen können. Gerade in den Braunkohlenrevieren Mitteldeutschlands und der Lausitz ist durch den Strukturwandel mit dem Wegfall der KWK-Leistung für Fernwärmenetze und mit der Metamorphose früherer Tagebau-Wunden zur heutigen Seenlandschaft nicht nur eine naheliegende Nutzungsoption für Seethermie, sondern auch ein symbolträchtiges Image für eine generell nachhaltige und regionale energetische Versorgung der Zukunft entstanden.

Angesichts der Diskussionen über andere erneuerbare Energieträger zeigt sich, wie wichtig ein solches positives Image ist und dessen Beeinträchtigung unbedingt zu vermeiden ist. Aus diesem Grund kommt einem ersten Seethermie-Projekt und dessen erfolgreichen Abschluss eine große Bedeutung zu.

Das Potenzial der Seethermie wurde in der Schweiz bereits früh erkannt. Bis heute nimmt die Schweiz daher eine Vorreiterrolle in Entwicklung und Nutzung ein. In Deutschland galten im Vergleich dazu sicherlich andere Voraussetzungen, da die für ein großes Industrieland erforderliche günstige Strom- und Energieversorgung bisher durch die Nutzung fossiler Energieträger – in diesem Falle aus bedeutenden Braunkohlenlagerstätten – gewährleistet werden konnte.

Aufgrund der beschriebenen Entwicklung fehlt es zunächst an der passfähigen Wärmeinfrastruktur. Hier bedarf es weiterer Forschung, Technologieentwicklung und Investitionen. Die Erfahrung zeigt, dass eine Installation niedrigtemperierter Wärmeinfrastruktur bei Neuinvestitionen deutlich einfacher umzusetzen ist als die Umrüstung des Bestands.

Ein Nachholbedarf Deutschlands bezüglich der Seethermie besteht vor allem in der Expertise aller Beteiligten (Wissenschaftler:innen, Ingenieur:innen, Behörden), da bisher kaum Erfahrungen mit Anwendungen gemacht wurden. Eine (positive) Sensibilisierung der Wasserbehörden ist essentiell. Umfragen unter deutschen Wasserbehörden durch (Kammer et al. 2015) ergaben, dass 70 % von ihnen noch nie Wasserrechtsanträge zur Seethermie bearbeitet haben. 19 % gaben an, dass in ihrem Einflussgebiet bereits Seewasserpumpen vorhanden sind (Kammer et al. 2015).

Für spezielle Fragestellungen bei der Anordnung einer seethermischen Anlage wie nach der Entnahmetiefe oder der Abflussmenge sind verallgemeinerbare Hinweise schwierig, sondern nur individuell möglich, da jeder See mit seinen spezifischen Eigenschaften unterschiedlich auf Eingriffe reagiert.

Die Berücksichtigung dieser Individualität jedes Gewässers bei einem seespezifischen Management trägt nach Prognose der Autoren dazu bei, dass die Folgen der Seethermie

für die Gewässerökologie äußerst gering gehalten werden können. Den Einfluss der seethermischen Nutzung so niedrig wie nur möglich zu halten, verbessert zudem von vornherein die Aussichten auf Akzeptanz und Genehmigungsfähigkeit.

Die innovative Vakuum-Flüssigeis-Technologie bietet neue Chancen zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit seethermischer Nutzung. Durch die Möglichkeit des Betriebes mit Eisbildung bestehen für die Vakuum-Flüssigeis-Technologie keine besonderen Anforderungen an eine „ideale“ Temperatur der Wasserentnahme. Die Wasserentnahme kann somit nach gewässerökologischen oder Kostengesichtspunkten erfolgen.

Abschließend zu diesem Kapitel werden die Ergebnisse des State of the Art in eine SWOT-Analyse überführt (Tabelle 2). Als ein Instrument der strategischen Planung dient die SWOT-Analyse der Positionsbestimmung und der Strategieentwicklung, in diesem Falle für die Nutzbarmachung der Seethermie in den Tagebaurestseen.

Zunächst werden in der externen Analyse Chancen (Opportunities) und Risiken (Threats) gegen-übergestellt (linke Spalte in Tabelle 2). Vornehmliche Chancen für die Seethermie bieten die zunehmende Nachfrage nach ‚Grüner Wärme‘, die Potenziale des ‚Neuseenlandes‘, eine zu erwartende verbesserte Wirtschaftlichkeit durch Technologieentwicklung und Förderung u.a. Risiken werden in erster Linie in den noch wenig oder unerforschten Auswirkungen auf die Tagebaurestseen und die damit im Zusammenhang stehende Genehmigungsfähigkeit – auch angesichts der Neuheit des Themas – gesehen.

Die interne Analyse wägt Stärken (Strengths) und Schwächen (Weakness) der beteiligten Akteure ab. Zu den Stärken gehören eine enorme fachliche Expertise, Motivation und Innovationskraft von Wissenschaft und Ingenieur:innen sowie das Engagement weiterer Stakeholder in der Region, gepaart mit einem wachsenden Bewusstsein nachhaltigkeitsorientierten Handelns. Schwächen offenbaren sich angesichts fehlender Erfahrungen mit Seethermie sowie mit Praxisanwendungen der Flüssigeis-Technologie und mit Unsicherheiten hinsichtlich künftiger Genehmigungsaufgaben.

In der Strategieabwägung werden nun die Analysefelder kombiniert: So werden die Chancen mit fachlicher und innovativer Stärke genutzt, indem zuvorderst die Expertise verschiedener Disziplinen zusammengeführt und neuartige Technologien eingebunden werden. Mit den Stärken wird zudem den Risiken begegnet, indem ein belastbarer Kenntniszuwachs durch Messen und Simulieren generiert wird. Die Schwächen werden abgebaut, indem andere Praxisanwendungen adaptiert und mit der prototypischen Anwendung Erfahrungen gesammelt und somit die Chancen besser genutzt werden.

Für den Abbau der Schwächen werden die Chancen genutzt, indem andere Praxisanwendungen adaptiert und mit der prototypischen Anwendung Erfahrungen gesammelt werden. Der Abbau eigener Schwächen und die Verringerung der Risiken erfolgt u.a. durch die Schließung weiterer Kenntnislücken, der Beschaffung von Daten und der Diskussion mit den Behörden hinsichtlich der Genehmigungsfähigkeit.

Mit der SWOT-Analyse zur Nutzbarmachung der Seethermie aus den Tagebaurestseen im Raum Leipzig wurde eine Strategie entwickelt, mit welchen Mitteln bestehende Risiken reduziert und Schwächen abgebaut werden können, um das enorme Potenzial einer künftigen alternative Wärmeversorgung zuzuführen.

Alle Details sind der Analyse in Tabelle 2 selbst zu entnehmen.

Tabelle 2: SWOT-Analyse zur Nutzung von Seethermie.

| SWOT-Analyse zur Nutzbarmachung von Seethermie aus den Tagebaurestseen im Raum Leipzig | | Interne Analyse (Akteure in der Region) | |
|--|---|--|--|
| | | Stärken (Strengths) | Schwächen (Weaknesses) |
| | | <ol style="list-style-type: none"> 1. große fachliche Expertise von Wissenschaft und Ingenieur:innen in der Region aus allen umsetzungsrelevanten Disziplinen für Seethermie 2. Motivation zum interdisziplinären Zusammenarbeiten 3. Innovationskraft in der Region 4. Engagement von Institutionen, Unternehmen, Vereinen und Einzelpersonen 5. Zunahme / Bewusstsein nachhaltigkeitsorientierten Handelns 6. Förderung des Strukturwandels | <ol style="list-style-type: none"> 1. bisher keine Erfahrungen herkömmlicher Seethermie in den Tagebaurestseen 2. keine Praxisanwendung mit Flüssigeis-Technologie für Seethermie 3. Unsicherheit hinsichtlich künftiger Genehmigungsaufgaben 4. ggf. eingeschränkte Repräsentanz bei zu kurzen Messzyklen (Seewasser-Monitoring) 5. (gefühlte) Unsicherheit durch Strukturwandel |
| Externe Analyse (Umfeld) | Chancen (Opportunities) | S-O-Strategien (mit welchen Stärken werden die Chancen des Umfeldes genutzt) | W-O-Strategien (wie können Schwächen abgebaut werden, um Chancen besser zu nutzen) |
| | <ol style="list-style-type: none"> 1. Genereller Umsetzungsdruck: Grüne Wärmewende, Entwicklung alternative Wärmeversorgungs-lösungen 2. Leipzig: absehbares Ende der Versorgung durch KW Lippendorf, Klimanotstand 3. Enorme Potenziale im Umfeld von Leipzig durch zahlreiche Tagebaurestseen 4. Verbesserung von Technologien in den letzten Jahren (kalte Netze, Wärmepumpen, Flüssigeis-Technologien) 5. zunehmende Hinwendung zu systemischen Lösungen, Sektorenkopplung 6. Senkung von Gesteungskosten 7. zu erwartende bessere öffentliche Akzeptanz als andere erneuerbare Energien 8. Impulsgebung für andere Regionen (Übertragbarkeit) | <p>mit fachlicher und innovativer Stärke Chancen nutzen</p> <p>Zusammenführung der fachlichen Expertise verschiedener Disziplinen zur Nutzung von Seethermie (= Projektinhalt)</p> <p>Innovationsbereitschaft: Einbindung neuartiger Technologien</p> <p>klare Aufgabenverteilung und Zielorientierung (Strukturierung von Arbeitspaketen)</p> <p>Entwicklungsschwerpunkte: Wirtschaftlichkeit und Genehmigungsfähigkeit</p> <p>Nutzung von Fördermitteln</p> <p>Untersuchung der Übertragbarkeit für Technologieexport</p> | <p>mit prototypischer Anwendung Chancen der Seethermie nutzen und Schwächen abbauen</p> <p>Erfahrungen sammeln mit prototypischen Seethermie-Projekten</p> <p>Erfahrungsaustausch mit Kenntnisträgern (z.B. Schweiz)</p> <p>andere Praxisanwendungen mit Flüssigeis-Technologie für Seethermie adaptieren / simulieren</p> <p>Unsicherheiten mit Messungen begegnen</p> <p>Öffentliche Akzeptanz nutzen für die Überwindung behördlicher Unsicherheiten</p> <p>Strukturwandel als Chance und Wachstumstreiber begreifen</p> |
| | Risiken (Threats) | S-T-Strategien (wie werden die Stärken gezielt eingesetzt, um Risiken zu reduzieren) | W-T-Strategien (wie können eigene Schwächen reduziert und Risiken abgebaut werden) |
| | <ol style="list-style-type: none"> 1. sensibler chemischer und biologischer Zustand künstlicher Seen, deren Naturierung nicht abgeschlossen ist 2. kein erreichter Endzustand der Seen (Spiegelhöhe, Fließdynamik) 3. Jahresgang der Temperaturverläufe in verschiedenen Tiefen 4. ggf. zu starker Einfluss einer Seethermie-Anlage auf Wassertemperatur des Sees 5. Genehmigungsfähigkeit, Unsicherheit von Behörden im Rahmen von Genehmigungen, keine speziellen Richtlinien 6. Wirtschaftlichkeit seethermischer Nutzung, daraus erwachsende Unsicherheit von Investor:innen und Stakeholdern 7. keine exakte Bedarfsdimensionierung eines künftigen oder fiktiven Quartiers | <p>Erarbeitung eines umsetzungsorientierten Kenntnis-zuwachses mit Mitteln des Messens und Modellierens / Simulierens</p> <p>Konzept und Umsetzung eines Messprogrammes</p> <p>Wirtschaftlichkeit mit Sensitivitätsanalysen und Varianten optimieren</p> <p>Bedarfsdimensionierung (exemplarisches Quartier) in Varianten</p> <p>potenzielle Investoren einbeziehen</p> <p>Fortführung in weiteren Projekten</p> | <p>Schließung von Kenntnislücken durch Adaption, Antizipierung und Datenakquise</p> <p>State of Art /Auswertung von Seethermie-Projekten national / international</p> <p>Datenakquise bei Dritten (LMBV...)</p> <p>Adaption von UVP auf Seethermie;</p> <p>intensive Diskussion mit Genehmigungsbehörden, Antizipierung des Behördenermessens</p> <p>eingeschränkte Repräsentanz der Messungen durch Extrapolation abbauen oder Messzyklen verlängern</p> <p>Defizitanalyse</p> |

3 Quartiersansatz

3.1 Das Quartier als optimale energetische Versorgungseinheit

Innerhalb des Systemzusammenhanges zwischen Gebäude und Stadt liegt das wesentliche energetische Optimierungspotenzial im Maßstab des Quartiers. Der erwartete Effekt einer hohen Effizienzsteigerung wird daher aus der Rolle des Quartiers als die entscheidende räumliche Einheit einer dezentral geführten energetischen Versorgung abgeleitet.

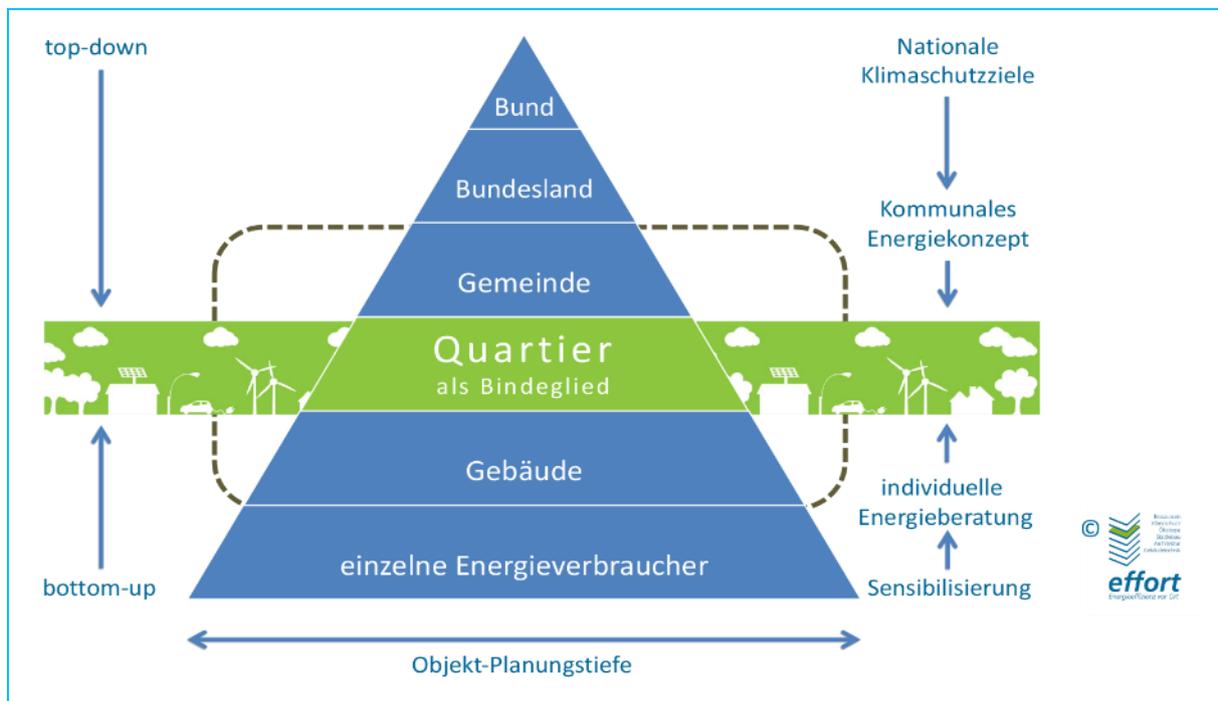


Abbildung 26: Das Quartier als Bindeglied zwischen übergeordneten Planungen / Konzepten und gebäudebezogenen Energieeffizienzmaßnahmen (aus (Roselt et al. 2015))

Zudem können hier Top-down-Prozesse (städtische Konzepte und Förderungen) mit Bottom-up-Aktivitäten als lokale Ökonomien der Verbraucher:innen bzw. Bürger:innen, aber auch der Eigentümer verknüpft werden (Abbildung 26). Dabei wird unter ‚Quartier‘ nicht immer eine städtebauliche Struktur, sondern eine energetisch sinnvoll zusammenfassbare räumliche Einheit verstanden. In der Praxis kann sich die Abgrenzung daher nach einem dezentralisierbaren Versorgungsgebiet richten.

3.2 Der exemplarische Standort: das Quartier ‚Neue Harth‘

Das zukünftige ‚Quartier‘, die Hotelanlage Neue Harth, wurde für diese Arbeit ausgewählt. Maßgebend ist der ‚Masterplan Neue Harth 2015‘, erstellt vom Preisträger labor4+, Dresden im Auftrag des Zweckverbandes Planung und Erschließung ‚Neue Harth‘ aus dem

Jahre 2015. Die Auswahl dieses Projektes als ‚Bedarfsträger‘ für eine alternative Seethermie-Nutzung entsprang der günstigen Konstellation des zu gestaltenden Landschaftswandels hin zu einem für Naherholung und Tourismus attraktiven Leipziger Neuseenland.

Dabei besitzt die Umsetzung dieses Planes (ob in dieser oder einer ähnlichen Form) reale Chancen, da die Etablierung an einem Seeufer mit Freizeiteinrichtungen, Naturnähe, unmittelbarem Autobahnanschluss und nicht zuletzt dem Freizeitpark Belantis als Besucher:innenmagnet in der Nähe für einen wirtschaftlichen Betrieb hervorragende Voraussetzungen bieten.



Abbildung 27 a) und b): Lage der Hotelanlage ‚Neue Harth‘ südwestlich von Leipzig am Zwenkauer See (labor 4+)

Konkret besteht das Ziel, am Nordufer des Zwenkauer Sees Übernachtungsangebote mit entsprechenden gastronomischen Einrichtungen zu schaffen, um den Freizeitpark zu einem Mehrtagespark zu entwickeln und für Parkbesucher:innen breiter aufgestellte Angebotspakete anbieten zu können (Abbildung 27). Die geplanten Gästezahlen sollen langfristig auf 1 Million im Jahr steigen.

Zu Gunsten eines durchgängigen Landschaftsraumes werden die intensiven Nutzungen und städtebaulichen Verdichtungen punktuell konzentriert und anstelle einer massiven Hotelanlage als kleine "Feriendörfer" unterschiedlicher Charakteristik in die sukzessiv entstehende Landschaft eingebettet. Dabei nimmt die Größe und Dichte der dörflichen Strukturen vom im Westen gelegenen "Hafendorf" bis hin zu den östlich in die Landschaft eingebetteten "Aktivhäusern" und dem Camping-Areal ab (Abbildung 28).

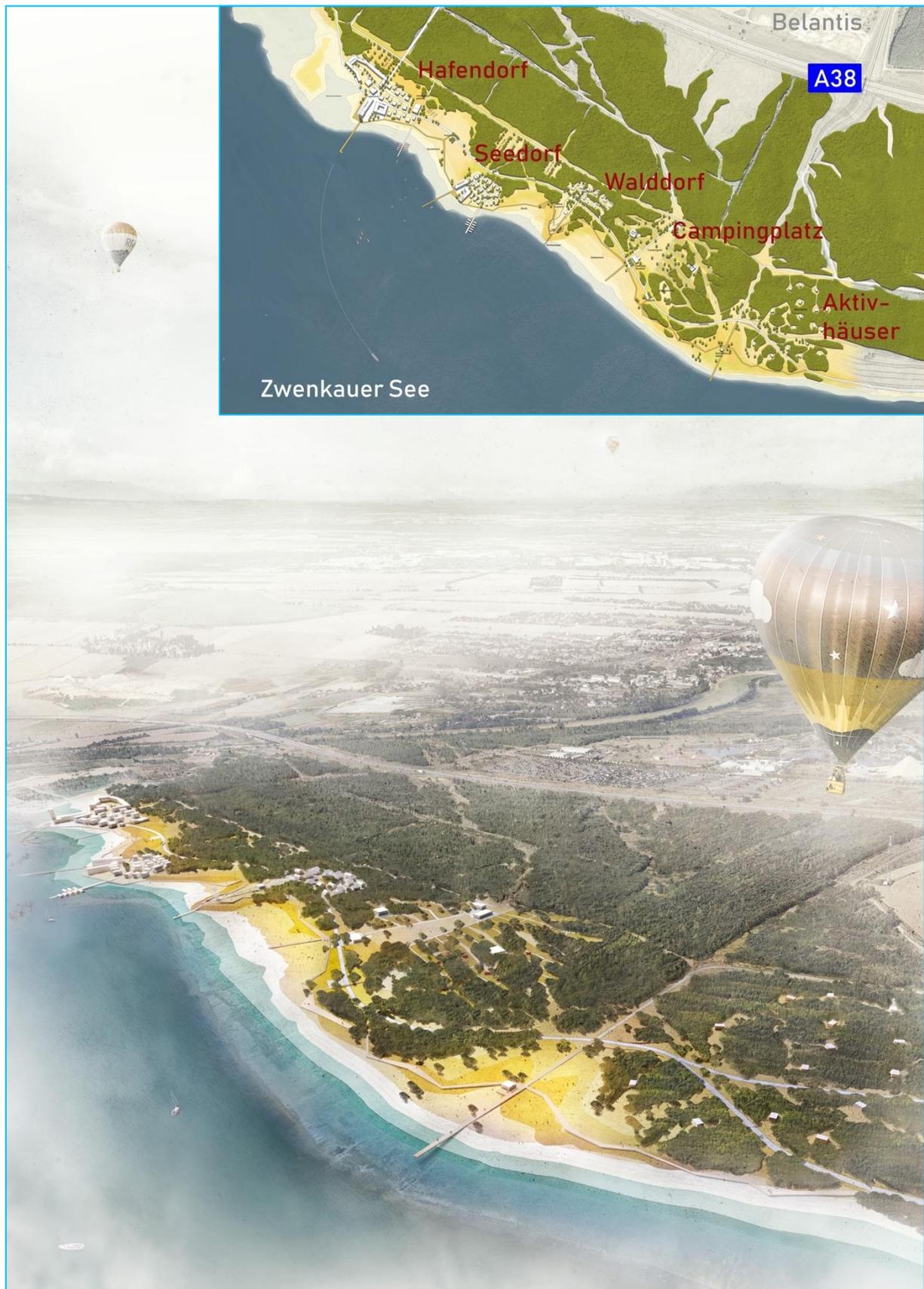


Abbildung 28: Anordnung der Feriendörfer (oben rechts) und Vogelperspektive (labor 4+)

Um die dargestellte "dörfliche Urbanität" zu erreichen, sind neben einzelnstehenden Gebäuden auch Doppelhäuser vorgesehen; eine Höhe von max. 2 Stockwerken wird jedoch eingehalten. Die spiegelt sich in den Gebäudetypen, wie in Abbildung 30 dargestellt, wider.

3.3 Quartiersumgebung



Abbildung 29: Administrative Grenzen und Schutzzonen

Folgende Faktoren der Quartierseinbettung /-umgebung wurden berücksichtigt:

Raumwiderstände

- ▶ Administrative Grenzen: Die Grenze der Kreise Leipzig und Leipziger Land durchqueren die Feriendörfer in ihrem östlichen Teil (Abbildung 29).
- ▶ Gewässerzuordnung im Wasser- und Bergrecht: Aktuell untersteht der Zwenkauer See dem Bergrecht, da die notwendigen Sanierungsmaßnahmen am Gewässer noch nicht abgeschlossen sind. Erst nach deren Abschluss kann das Gewässer aus dem Bergrecht entlassen werden.
- ▶ Wasserspiegel Endhöhe / Jahr: Für die Einstellung der Endspiegelhöhe (+113,5 m NHN) wird für den Zwenkauer See mit 2038 gerechnet (laut (LMBV mbH 2020))
- ▶ Sensibilität, geringer Wasseraustausch

Bedarfe

- ▶ Wärmebedarf entspr. saisonaler Schwankung und touristischer Auslastung
- ▶ ggf. Ermittlung potenzieller Kälteabnehmer

3.4 Wärmebedarf

Angaben zum erwartbaren Wärmebedarf werden im genannten Masterplan nicht gegeben. Für die Nutzung der Hotelanlage als exemplarischer Standort wird eingeschätzt, dass der Wärmebedarf, der aus den Plänen angesichts der Gebäude ermittelt werden kann, als Obergrenze aufzufassen ist, da eine massivere Bebauung des Areals aufgrund von Raumwiderständen usw. auszuschließen ist.

Für die Ermittlung der Wärme- und Kältebedarfe wurden folgende Eingangsgrößen und Annahmen berücksichtigt:

Eingangsgrößen sind die Anzahl der Nutzungseinheiten je Nutzungsart aus dem Masterplan wie in Tabelle 3 dargestellt. Weiterhin wurden spezifische Wärmebedarfe in Anlehnung an die Effizienzklassen nach Gebäudeenergiegesetz GEG (BMI 2020), Anlage 10, zugrunde gelegt (Tabelle 3, vierte Spalte).

Neben diesen Eingangsgrößen wurden zudem folgende weiteren Annahmen getroffen:

Die Anteile der beheizten Flächen wurde je Nutzungseinheit aus Erfahrungswerten festgelegt, da keine verwertbaren Flächenangaben zu den Nutzungsformen und Gebäudetypen (Abbildung 30) zur Verfügung standen. Diese Annahmen sind in Tabelle 3 in der Spalte 3 enthalten. Als weitere Annahme wurden die Vollbenutzungsstunden der Erzeugung mit 1.100 h/a angesetzt. Dieser Wert liegt niedriger als bei Wohngebäuden und spiegelt dadurch die saisonale Nutzung für touristische Zwecke wider.

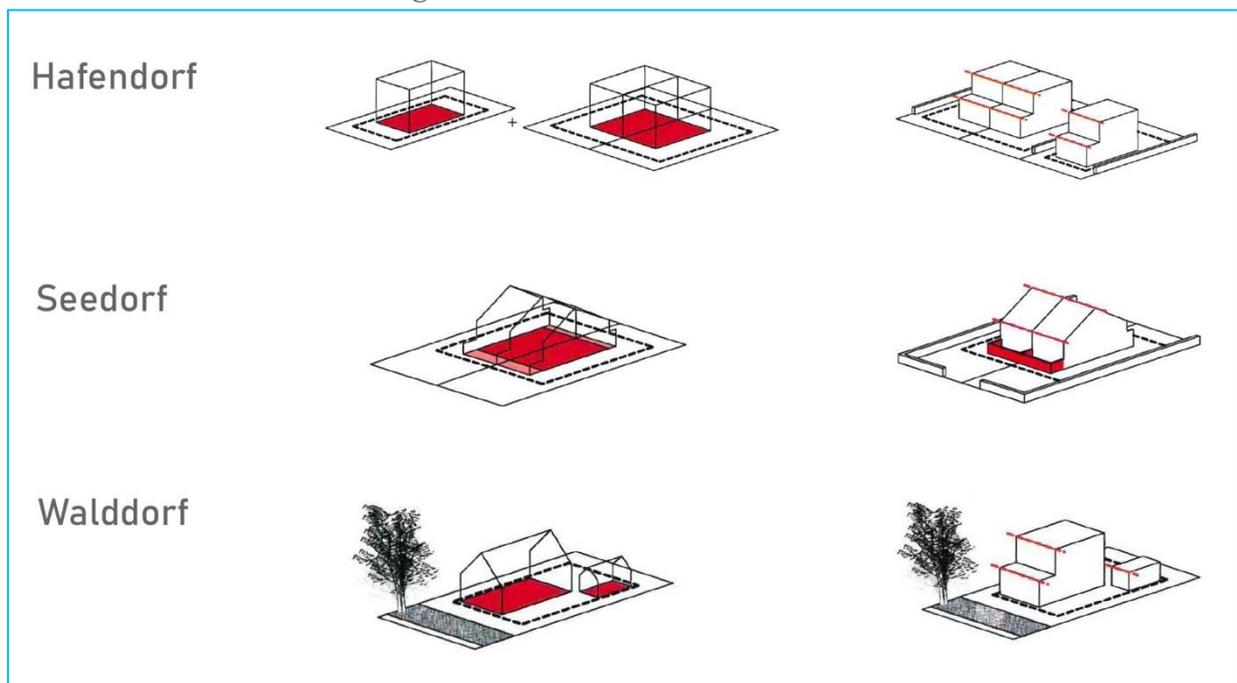


Abbildung 30: Gebäudetypen der Feriendörfer (labor 4+)

Tabelle 3: Ergebnisse der Bestimmung der Heizlast aus den Nutzungseinheiten des Masterplans

(beheizte x spez. Heizlast = Heizlast)

| Kategorie | Anzahl | Annahme spez. beheizte Fläche je Stück | Annahme spez. Heizlast [W/m ²] | Heizlast [kW] |
|-----------------------------------|--------|--|--|---------------|
| Appartements in Einzelhäusern | 84 | 120 | 50 | 504 |
| Appartements in Doppelhäusern | 60 | 100 | 50 | 300 |
| Appartements in komplexen Anlagen | 38 | 100 | 50 | 190 |
| Kreativ-/ Aktivunterkünfte | 25 | 50 | 60 | 75 |
| Hotelzimmer | 100 | 25 | 60 | 150 |
| Versorgungseinheiten | 4 | 200 | 60 | 48 |
| Gastronomie überdurchschnittlich | 2 | 200 | 60 | 24 |
| Gastronomie Standard | 1 | 150 | 60 | 9 |
| Sportzentrum | 1 | 200 | 60 | 12 |
| Summe | | | | 1.312 |

Tabelle 4: Ergebnisse der Bestimmung des Gesamtwärmebedarfes aus den Nutzungseinheiten des Masterplans

| Kategorie | Anzahl | Heizlast [kW] | Nutzenergiebedarf Wärme [kWh/a] |
|-----------------------------------|--------|---------------|---------------------------------|
| Appartements in Einzelhäusern | 84 | 504 | 554.400 |
| Appartements in Doppelhäusern | 60 | 300 | 330.000 |
| Appartements in komplexen Anlagen | 38 | 190 | 209.000 |
| Kreativ-/ Aktivunterkünfte | 25 | 75 | 82.500 |
| Hotelzimmer | 100 | 150 | 165.000 |

| Kategorie | Anzahl | Heizlast [kW] | Nutzenergiebe- darf Wärme [kWh/a] |
|---|--------|------------------|---|
| Versorgungseinheiten | 4 | 48 | 52.800 |
| Gastronomie überdurchschnittlich | 2 | 24 | 26.400 |
| Gastronomie Standard | 1 | 9 | 9.900 |
| Sportzentrum | 1 | 12 | 13.200 |
| Summe | | 1.312 | 1.443.200 |

Die jährlichen Wärmebedarfe wurden anschließend räumlich auf die Cluster Hafendorf, Seedorf, Walddorf und Camping verteilt (Abbildung 31). Dabei wurde eine Abschätzung darüber vorgenommen welche Anzahl der jeweiligen Nutzungseinheiten sich im jeweiligen Cluster befinden werden. Die Detaildaten sind im Anhang 3 aufgeführt. Im Ergebnis stellt sich die räumliche Verteilung wie in Abbildung 32 dar. Es zeigt sich, dass der hauptsächliche Wärmebedarf im Hafendorf und Seedorf allokiert sind. Diese Verteilung wurde nachfolgend als Basis für die Dimensionierung der Übergabestationen je Cluster herangezogen. Der Wärmebedarf der Aktivhäuser wurde nicht in die gemeinsame netzgebundene Versorgungslösung einbezogen, weil dort eher dezentrale Lösungen sinnvoll sein werden.

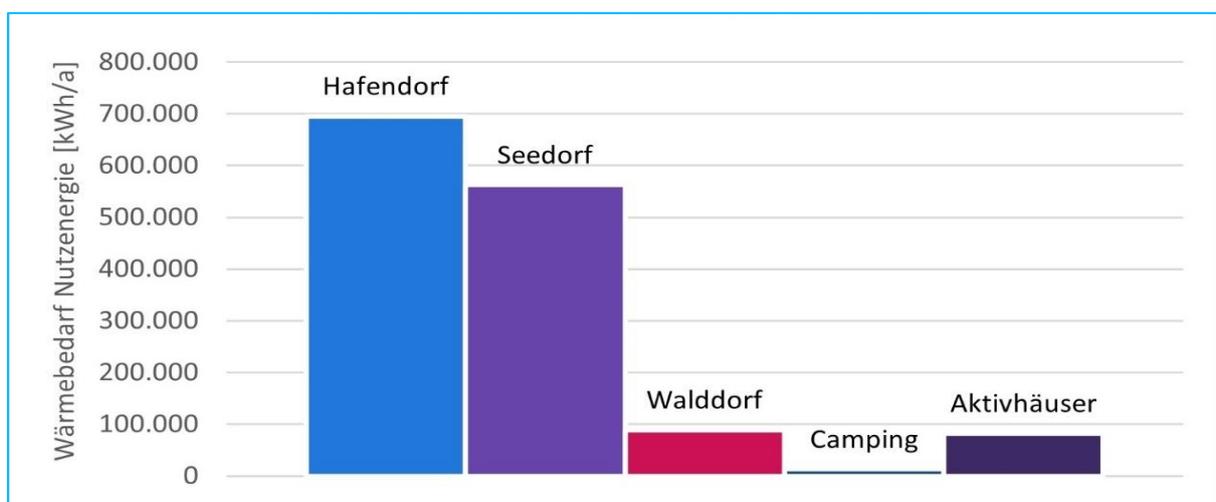


Abbildung 31: Hafendorf und Seedorf stellen den wesentlichen Wärmebedarf

Nachfolgend wurde ein Wärmelastgang für das Quartier berechnet. Dabei wurde wie folgt vorgegangen: Um den jährlichen Energiebedarf auf Stundenwerte zu allokiieren, wurde auf das analytische Lastprofilverfahren Gas (SLP-Gas) des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW 2018) herangezogen. Das Verfahren generiert stündlich aufgelöste Lastprofile für den Wärmebedarf abhängig von der Nutzergruppen (z.B. Gewerbe, Hotel, Wohnungen), der regionalen Verortung und dem Verlauf der Außentemperaturen. Gleichzeitig wird das spezifische Nutzerverhalten an Werk-, Sonn- und Feiertagen berücksichtigt. Eine detaillierte methodische Beschreibung zum Verfahren findet sich im BDEW/VKU/GEODE-Leitfaden „Abwicklung von Standardlastprofilen Gas“ ab Seite

57 (BDEW et al. 2018). Als Basis wurde das Kalenderjahr 2020 mit den Tagesmitteltemperaturen am der Wetterstation Leipzig Messe zugrunde gelegt.

Im Ergebnis steht ein stündlicher Lastgang für das gesamte Quartier, der nachfolgend als Grundlage für die Modellierung des Gesamtsystems dient (Abbildung 32).

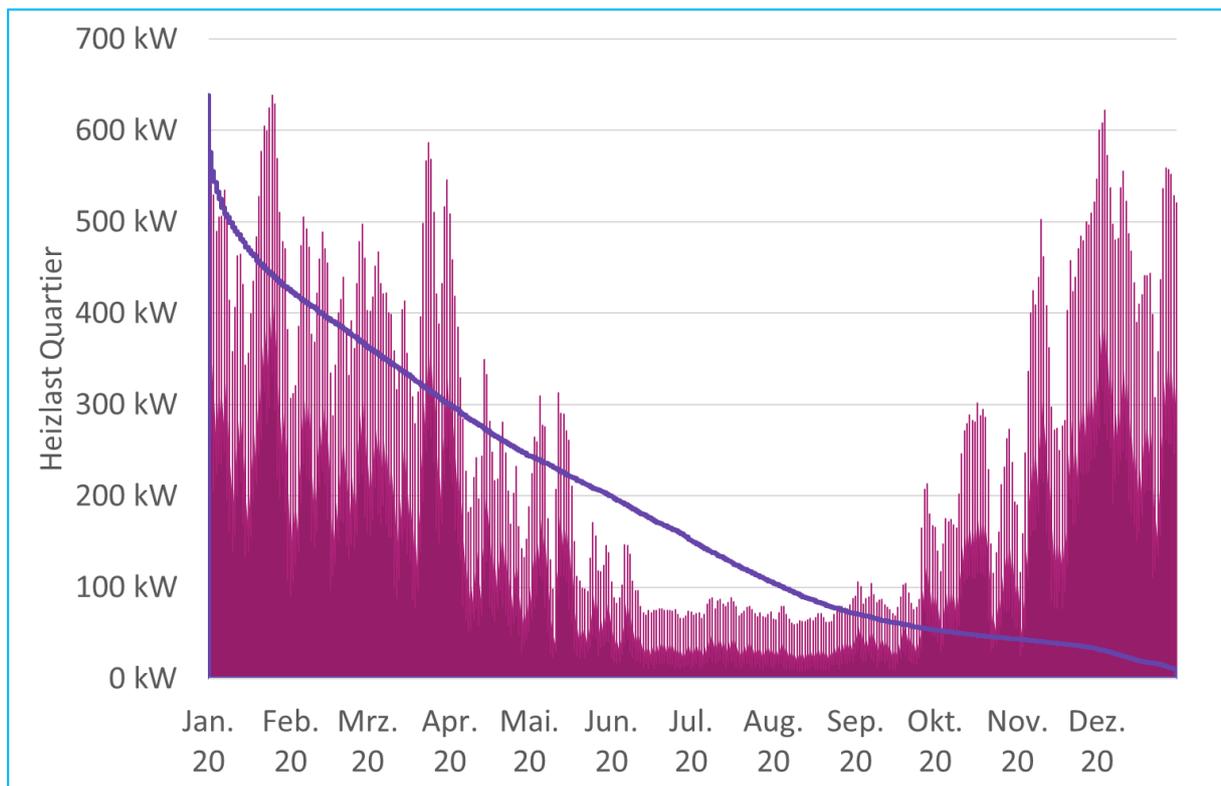


Abbildung 32: Ermittelte Zeitreihe für die Heizlast des Quartiers.

Die aus der Lastgangsynthese resultierende Heizlast liegt trotz der berücksichtigten Netzverluste von 15 % bedeutend niedriger als die Summe der Heizlast nach Tabelle 4. Grund hierfür ist der Bezug auf einen bestimmten Temperaturverlauf eines Jahres. Mit den aus der Lastganganalyse ermittelten Heizlast wurde nachfolgend auch die Abschätzung der Investitionskosten vorgenommen.

Aus der Abwägung verschiedener Netzvarianten, die im Zusammenhang mit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung noch einmal zu diskutieren sind, wurde eine Basisvariante der Wärmeversorgungsstruktur abgeleitet. Ihre Ausgestaltung wird im Abschnitt 6 vorgestellt.

4 Datengewinnung

4.1 Recherche und Auswertung vorliegender Daten zur Gewässermorphologie, Wasserwirtschaft und Gewässerchemie

Der unter Bergrecht stehende Zwenkauer See wird von der LMBV - Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH entsprechend den Festlegungen im Abschlussbetriebsplan seit Jahren intensiv untersucht. Für das Seethermie-Projekt sind dabei insbesondere folgende Daten von Interesse:

- ▶ Morphologie des Seebeckens
- ▶ Wasserstandsentwicklung im Zwenkauer See
- ▶ Wasserstandsentwicklung in den Grundwasserleitern
- ▶ Flutungsregime, Mengenbilanz
- ▶ Wasserbeschaffenheit Zuflüsse (Weiße Elster, Flutungswasser aus Tagebau Profen)
- ▶ Wasserbeschaffenheit Tagebaurestsee
- ▶ Wasserbeschaffenheit Grundwasser
- ▶ Wassertemperatur Zuflüsse, Grundwasser
- ▶ Wassertemperatur + Leitparameter Seewasser (Tiefenprofile)

Als Grundlage für die Projektbearbeitung konnten umfangreiche Daten der Gewässergeometrie, Wasserstands- und Beschaffenheitsentwicklung einschließlich zahlreicher Profilmessungen der Wassertemperatur recherchiert und durch die LMBV bereitgestellt werden (Tabelle 5).

Eine wertvolle Ergänzung stellen die von der Tauchbasis Zwenkau zur Verfügung gestellten Datenaufzeichnungen der in verschiedenen Teufen am Seeboden installierten Temperatursensoren dar (Abbildung 33). Für den Zeitraum vom 08.04.2019 bis 29.06.2020 liegen Stundenwerte der Gewässertemperatur am Seeboden für folgende Gewässertiefen vor:

- ▶ 1 m bis 25 m im 1 m-Intervall
- ▶ 30 m, 35 m und 40 m

Die Daten wurden auf Plausibilität geprüft und nach entsprechender Bereinigung fehlerhafter Werte in einer Datenbank für die weitere Auswertung aufbereitet.

Tabelle 5: Recherchierte Daten der LMBV

| Datenart | Messstelle | Parameter | | | | | | | | | Zeit- raum | Mess- intervall |
|---|---|-----------------------|------------------|------------------|---------|---------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|----------------------|
| | | elektr. Leitfähigkeit | Sauerstoffgehalt | Wassertemperatur | pH-Wert | Trübung | Redoxspannung | Analytik Programm 1 | Analytik Programm 2 | Analytik Programm 3 | | |
| Wasserchemie | HWE Zitzschen | x | x | x | x | x | | | | | 2014- 2020 | h |
| Wasserchemie | EBW Weiße Elster | x | x | x | x | x | | | | | 2018- 2020 | d |
| Wasserchemie | HWE Zitzschen | x | x | x | x | x | | | | | 2015- 2017 | d |
| Tiefenprofile | RZS2, RZS2-2, RZS2-3, RZS2-4, RZS2-5 | x | x | x | x | x | | | | | 2010- 2013 | q, m |
| Tiefenprofile | RZS2, RZS2-2, RZS2-3, RZS2-4, RZS2-5, RZS2-7 | x | x | x | x | x | | | | | 2014- 2021 | m |
| Vergleich Handmessung und Vor-Ort-Sensoren Flutung | HWE Zitzschen und EBW Weiße Elster | | x | x | x | | | | | | 2017- 2020 | |
| Flutungswasser Profen | EL0.1-3, EL0.1-3k | x | x | x | x | x | x | x | | | 2010- 2016 | |
| Weißer Elster | Weißer Elster (3.8.71) | x | x | x | x | x | x | x | | | 2013, 2016- 2020 | m |
| Grundwasser | 116 Mst. (GWL, Mst. Zwenkau, KV Böhlen, Harthkanal, RL Absetzer 13) | x | x | x | x | | x | | x | | | hj, j, q bis 2020 |

| Datenart | Messstelle | Parameter | | | | | | | Zeit- raum | Mess- intervall | |
|------------------------------|---|-----------------------|------------------|------------------|---------|---------|---------------|---------------------|---------------|--------------------|----------------------|
| | | elektr. Leitfähigkeit | Sauerstoffgehalt | Wassertemperatur | pH-Wert | Trübung | Redoxspannung | Analytik Programm 1 | | | Analytik Programm 2 |
| Umfeld- messungen | 89 Mst. (Umring ESP, COS, Werben, Böhlen WIT) | x | x | x | x | | x | x | | | hj, j, q bis 2020 |
| Seewasser | RZS2, RZS2-2, RZS2-3, RZS2-4, RZS2-5 | x | x | x | x | x | | | x | 2010-2020 | m, q |

h Stundenwerte

d Tageswerte

m Monatswerte

q Quartalswerte

hj halbjährliche Werte

j Jahreswerte

Analysenprogramm 1 pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Basen-/Säurekapazität pH 4,3/8,2, Karbonathärte, Gesamthärte, TIC, TOC, DOC, Ammonium-N, Nitrat-N, Nitrit-N, *ortho*-Phosphat-P, Gesamtphosphor, Chlorid, Sulfat, Silizium, Calcium, Magnesium, Natrium, Kalium, Eisen gelöst, Mangan gelöst, Chlorophyll a, Phaeophytin, Ionenbilanz

Analysenprogramm 2 pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Basen-/Säurekapazität pH 4,3/8,2, Nettoazidität, Gesamttrockenrückstand, Filtrattrockenrückstand, kalkaggressive Kohlensäure, Karbonathärte, Gesamthärte, Gesamtazidität bei pH 8,2, TIC, TOC, DOC, Ammonium-N, Nitrat-N, Nitrit-N, *ortho*-Phosphat-P, Gesamtphosphor, Sulfat, Chlorid, Fluorid, Sulfid, Calcium, Magnesium, Natrium, Kalium, Eisen gesamt, Eisen gelöst, Eisen 2+, Mangan gesamt, Mangan gelöst, Silizium, Aluminium, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom gesamt, Kupfer, Quecksilber, Nickel, Zink, Ionenbilanz

Analysenprogramm 3 pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Basen-/Säurekapazität pH 4,3/8,2, Karbonhärte, Härte gesamt, TIC, TOC, Ammonium-N, Nitrat-N, Nitrit-N, *ortho*-Phosphat-P, Phosphor gesamt, Sulfat, Chlorid, Sulfid, Silizium, Calcium, Calcium gelöst, Magnesium, Natrium, Eisen gesamt, Eisen gelöst, Eisen 2+, Mangan gelöst, Aluminium gesamt, Aluminium gelöst, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Zink, Cobalt, Bor, Uran

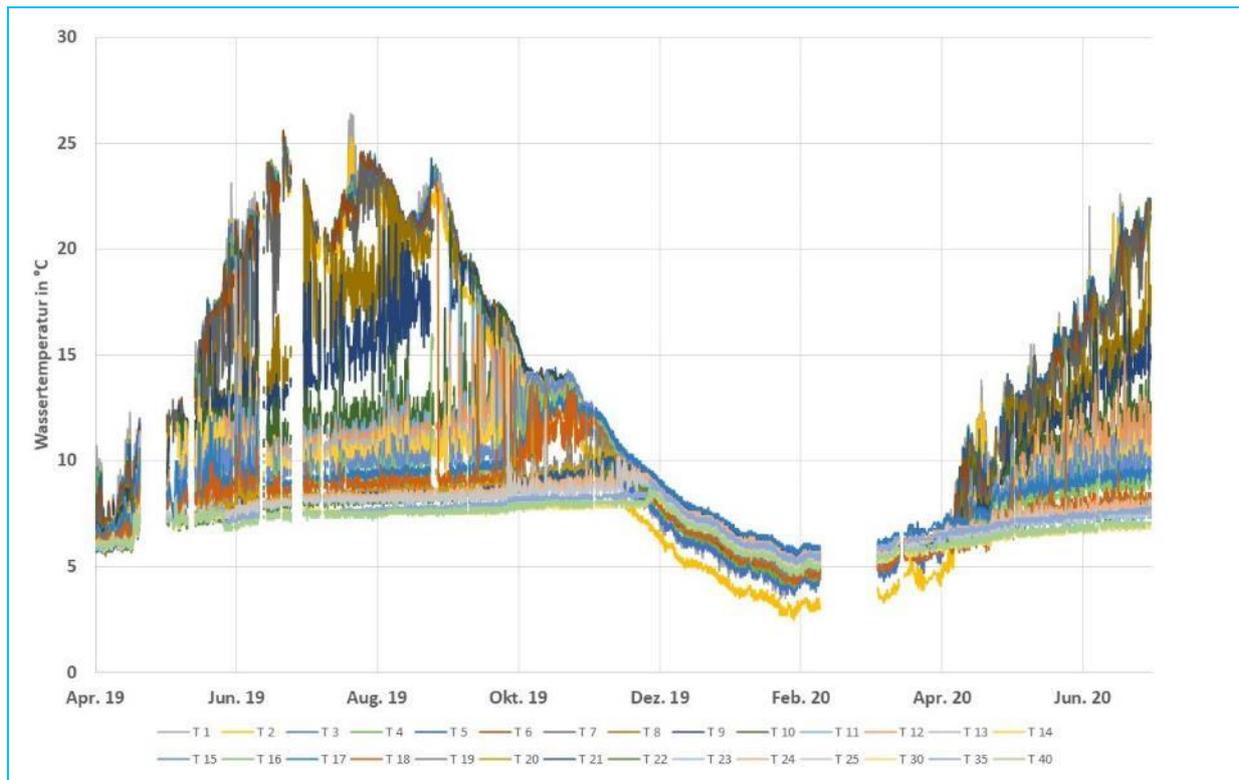


Abbildung 33: Daten der Tauchbasis Zwenkau; Wassertemperatur an der Gewässerbasis in Wassertiefen von 1 m (T1) bis 40 m (T40)

Die Auswertung der zeitlich hochauflösenden Temperaturdaten ergibt für Wassertiefen bis 20 m eine starke Beeinflussung der vertikalen Temperaturverteilung durch Windergebnisse.

Bereits ab Windstärke 3 (3,6 – 5,7 m/s) kommt es zu einer starken Durchmischung des Sees und zu einer signifikanten Beeinflussung des vertikalen Temperaturprofils bis in eine Tiefe von 15 m. Stärkere Winde wirken sich bis in eine Tiefe von 20 m aus.

In Abbildung 34 und Abbildung 35 ist dieser Effekt an einem Beispiel dargestellt. Der beständige, eine Stärke von 3-4 erreichende Südwestwind am Morgen des 27.07.2019 Uhr führte zu ausgeprägten Vertikalströmungen im See. Mit einer zeitlichen Verzögerung von wenigen Stunden sind folgende Temperaturänderungen zu verzeichnen:

- ▶ 8 m Tiefe: Temperatur sinkt um 4,6 K
- ▶ 10 m Tiefe: Temperatur steigt um 2,7 K
- ▶ 15 m Tiefe: Temperatur steigt um 1,0 K

Diese Effekte treten besonders deutlich in der Phase der Sommerstagnation mit ausgeprägter Temperaturschichtung in Erscheinung.

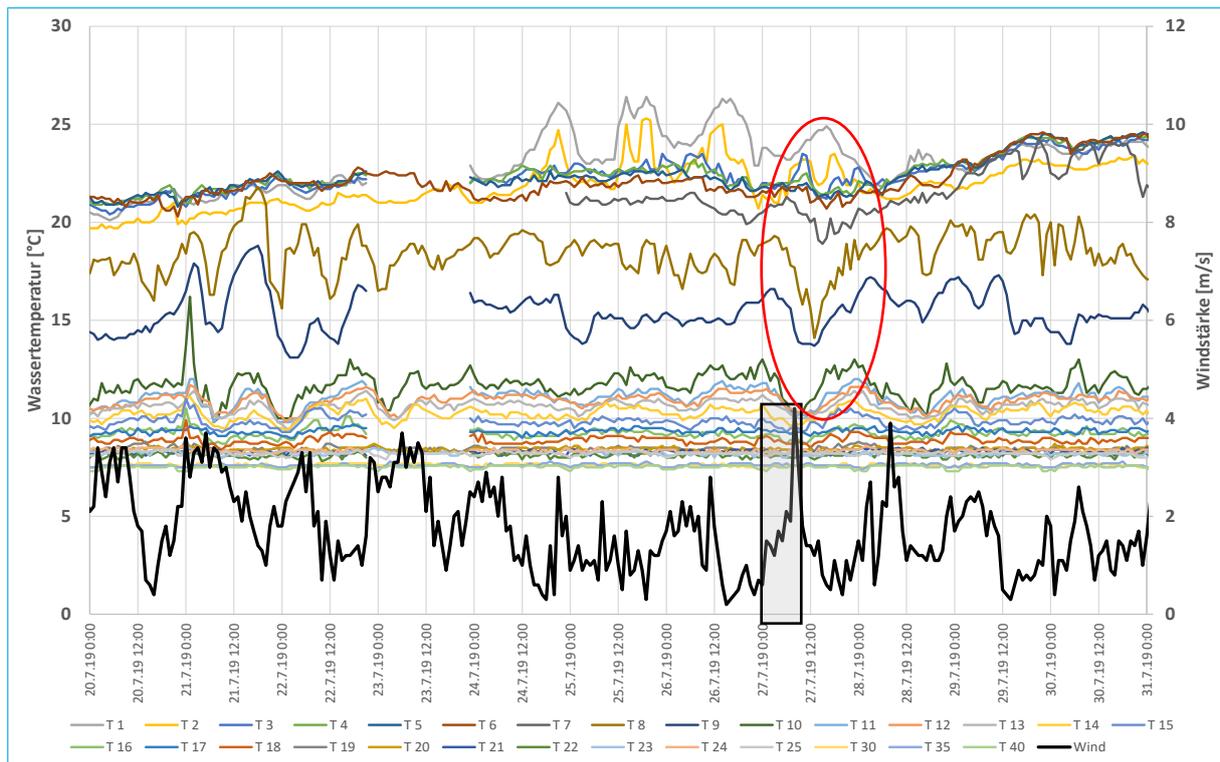


Abbildung 34: Daten der Tauchbasis Zwenkau; Wassertemperatur der Gewässerbasis in Wassertiefen von 1 m (T1) bis 40 m (T40) und Windstärke im Zeitraum vom 20.07.2019 0:00 Uhr bis zum 31.07.2019 0:00 Uhr der DWD-Station Leipzig-Holzhausen

schwarz markiert: Windereignis; rot: Temperaturveränderung zum markierten Windereignis

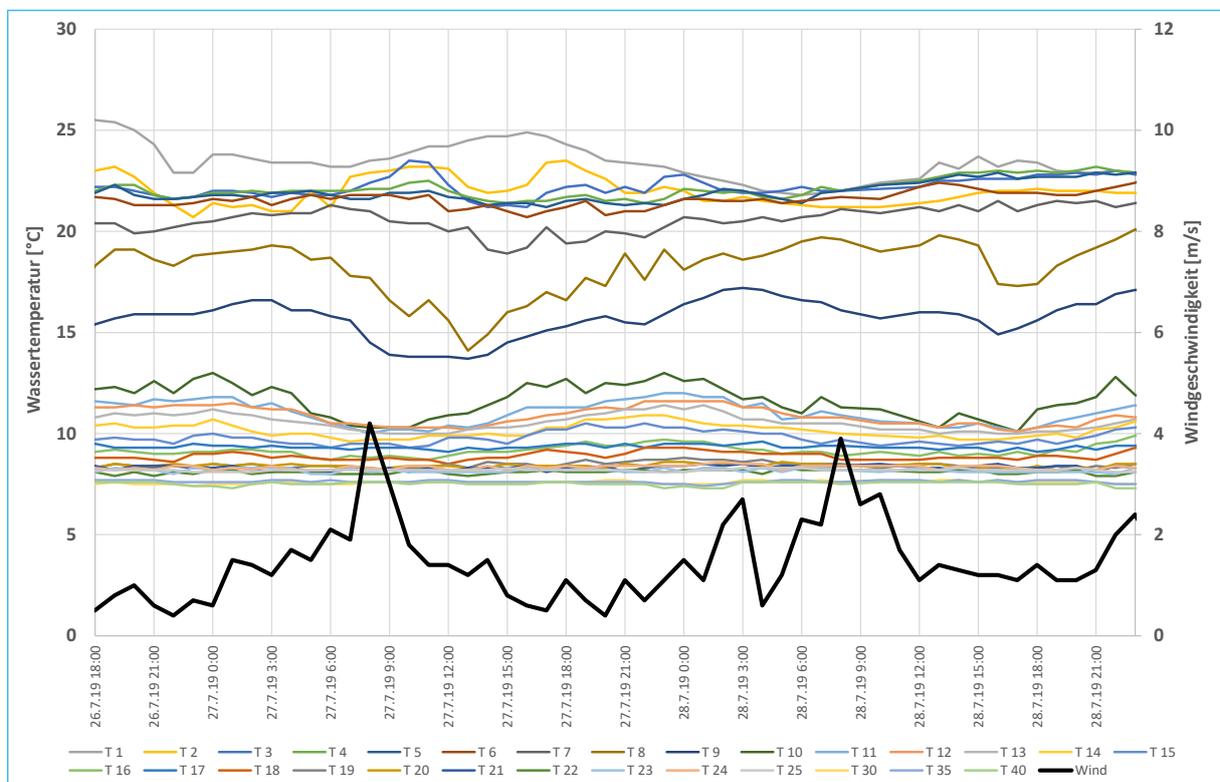


Abbildung 35: Detailansicht der Temperaturkurve während des Windereignisses aus Abbildung 34

Aus den recherchierten Daten lassen sich folgende Kenngrößen des Zwenkauer Sees für den geplanten Endzustand mit einem Wasserstand von +113,5 mNHN ableiten:

- ▶ Seefläche: 9,7 km²
- ▶ größte Ost-West-Ausdehnung: 6,1 km
- ▶ größte Nord-Süd-Ausdehnung: 4,0 km
- ▶ Wasservolumen: 176.000.000 m³
- ▶ Maximale Tiefe: 48 m
- ▶ Mittlere Tiefe: 17 m

Laut Planfeststellungsbeschluss soll der Zwenkauer See mit folgenden Lamellen bewirtschaftet werden:

1. Betriebsraum (IBR) im Höhenbereich zwischen +113,1 mNHN und +113,8 mNHN bei einem angestrebten mittleren Wasserstand von +113,5 mNHN
2. Gewöhnlicher HW-Rückhalteraum (IGHR) im Höhenbereich von +113,8 mNHN bis hin zum höchsten Wasserstand (HHW) von +115,6 mNHN

Derzeit ist der Wasserspiegel im See wegen der Baumaßnahmen am Harthkanal auf ca. +112,0 bis +112,5 mNHN abgesenkt.

4.2 Festlegung repräsentativer Messstellen und Konzeption eines Messprogramms

Zur Erhebung aktueller Temperaturdaten im Projektzeitraum wurde festgelegt, im Zwenkauer See drei Messbojen zu installieren (Abbildung 36, Tabelle 8). Jede Messboje wurde mit einer Temperaturmesskette mit ca. 20 Einzelsensoren, einem Datenlogger und einer Funkübertragungseinheit ausgerüstet. Die Sensoren erfassen die Entwicklung der Wassertemperatur von der Gewässeroberfläche bis zur Gewässersohle im Stundentakt (Tabelle 6).

Die Messboje JG-01 diene der Erfassung der vertikalen Temperaturentwicklung im Bereich des Zuflusses der Weißen Elster am Südwestrand des Zwenkauer Sees. Die Gewässerbasis fällt hier relativ steil ab.

Mit der Messboje JG-02 sollten die Verhältnisse im stark strukturierten Nordbereich erfasst werden. Die Gewässertiefe variiert hier aufgrund der Kippenstruktur über kurze Distanzen.

Im zentralen Seebereich mit einer Wassertiefe von ca. 45 m wurde die Messboje JG-03 angeordnet.

Die automatischen Messungen der Temperaturmessketten waren durch monatliche manuelle Messungen (Tabelle 7) der vertikalen Temperaturverteilung mit einem Messabstand von 0,1 m zu ergänzen. Im Rahmen der manuellen Messungen erfolgten zusätzlich Bestimmungen der Sichttiefe und Profilmessungen der elektrischen Leitfähigkeit.

Tabelle 6: Übersicht über die installierten Temperaturmessbojen

| Messboje | Lage | Wassertiefe | Anzahl Temperatur- sensoren | Anordnung der Sensoren in m unter Wasserspiegel |
|----------|-------------|-------------|-----------------------------------|--|
| JG-01 | Westufer | ca. 20 m | 20 | 1 m, 2 m, 3 m ... 20 m |
| JG-02 | Nordufer | ca. 20 m | 20 | 1 m, 2 m, 3 m ... 20 m |
| JG-03 | Tiefenrinne | ca. 45 m | 22 | 1 m, 2 m, 3 m ... 15 m, 20 m, 25 m, 30 m ... 50 m |

Tabelle 7: Messtage manueller Tiefenprofilmessungen

| Monat | Datum der Messung | Monat | Datum der Messung |
|-----------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| Juli 2020 | 24.07.2020 | Januar 2021 | 29.01.2021 |
| August 2020 | 28.08.2020 | Februar 2021 | 28.02.2021 |
| September 2020 | 02.10.2020 | März 2021 | 01.04.2021 |
| Oktober 2020 | 23.10.2020 | April 2021 | 01.05.2021 |
| November 2020 | 26.11.2020 | Mai 2021 | 04.06.2021 |
| Dezember 2020 | 21.12.2020 | | |

Tabelle 8: Lage der Messbojen (Koordinaten, Gemarkung, Flurstück)

| Boje-Nr. | Ostwert | Nordwert | Gemarkung | Flurstück |
|----------|---------|-----------|------------------|-----------|
| JG-01 | 309 994 | 5 678 550 | Zitzschen Flur 2 | 36/295 |
| JG-02 | 310 814 | 5 680 170 | Eythra | 643 |
| JG-03 | 312 111 | 5 679 923 | Eythra | 330 |

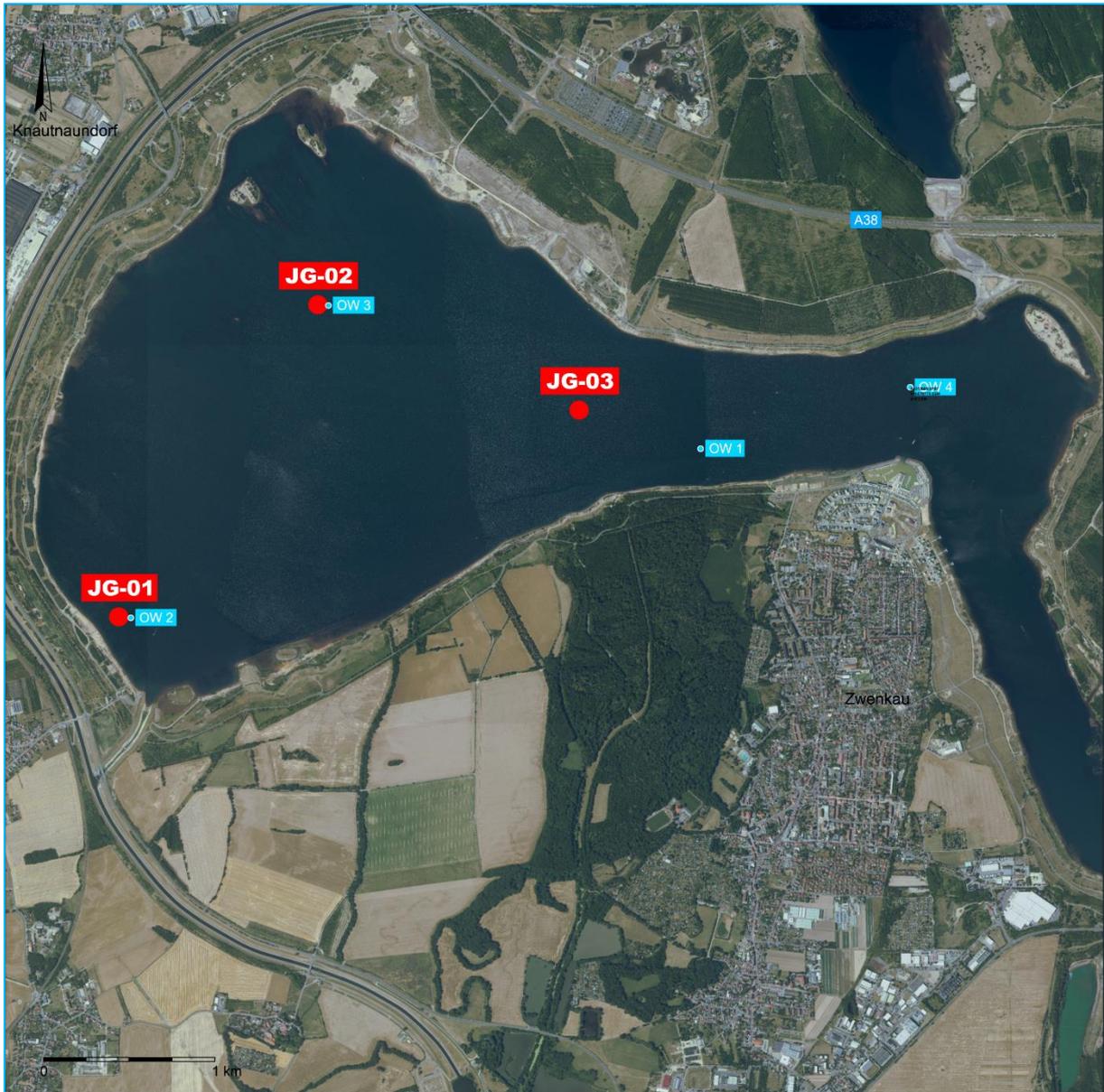


Abbildung 36: Geplante Lage der Messbojen und Messpunkte der manuellen Temperaturmessung im Zwenkauer See

4.3 Planung und Genehmigungsverfahren der Messstellen

Im Juli 2020 erfolgte nach der Grundlagenermittlung und Messnetzkonzeption die Planung der Temperaturmessbojen einschließlich Dimensionierung der Verankerungen.

Technische Daten der Messbojen:

- ▶ Bojen: 75 Liter
- ▶ Anker: Beton 135 kg
- ▶ Messkabel: Spezial-PUR Kabel für Temperaturmessketten mit integrierter Zugentlastung
- ▶ Temperaturfühler: Pt1000, digital, eingebaut in Messkabel

- Messbereich: -40 ... +85 °C
- Auflösung: 0,01 °C
- Genauigkeit: ± 0,1 °C
- ▶ Datenlogger: Funkdatenlogger enviLOG mini VA 24 Bit Speicher 2048 kB
- ▶ Länge Messkabel: 2*20 m (JG-O1; JG-O2); 1*50 m (JG-O3)
- ▶ Vertikaler Sondenabstand:
 - 1 m (JG-O1; JG-O2; JG-O3 Bereich 1-15 m)
 - 5 m (JG-O3 Bereich 15 m bis 50 m)

Für die Errichtung der Messbojen, bei denen es sich um genehmigungspflichtige Anlagen handelt, wurde am 22.07.2020 die wasserrechtliche Genehmigung nach § 36 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) und § 26 des Sächsischen Wassergesetzes (SächsWG) beim Umweltamt des Landratsamtes Landkreis Leipzig beantragt.

Nach Eingang aller Stellungnahmen (Stadt Zwenkau, Naturschutzbehörde, Fachbereich Wasserbau Sachgebiet Wasser/Abwasser, Landesdirektion Sachsen, LMBV) wurde am 28.09.2020 die Wasserrechtliche Genehmigung zur Errichtung der Temperaturmessbojen mit der Auflage von 19 Nebenbestimmungen erteilt (Landratsamt Landkreis Leipzig 2020). Der in einer Nebenbestimmung geforderte Gestattungsvertrag zwischen dem Betreiber der Bojen (JENA-GEOS®) und der LMBV wurde am 07.10.2020 unterzeichnet (LMBV mbH 2020).

4.4 Errichtung der Messstellen

Per GPS wurden die für die Messbojen geplanten Koordinaten angefahren und dabei mittels Handecholot (HONDEX PS-7) permanent die Wassertiefe geprüft. Die endgültige Festlegung der Bojenposition erfolgte unter Berücksichtigung der Morphologie des Seebeckens (Abbildung 37).

Nach dem Setzen der Ankersteine und Befestigen der Boje an den Ankerketten (Edelstahlketten bzw. Polypropylenseil) wurden die vorbereiteten Temperaturmessketten eingefädelt und die Logger bzw. Funkübertragungseinheit installiert sowie eine erste Funktionsprüfung durchgeführt (Abbildung 38).

Am 23.10.2020 nahmen Mitarbeiter von JENA-GEOS nach erfolgreicher Installation und Programmierung die Messbojen JG-01 (Abbildung 39) und JG-03 in Betrieb. Die Messkette OW 2 konnte nach Lieferung eines erforderlichen Ersatzteiles am 22.12.2020 ebenfalls in Betrieb genommen werden.

Die endgültige Lage der Messbojen wurde dem Hafenmeister am 26.10.2020 mitgeteilt (Tabelle 9).



Abbildung 37: Wassertiefenmessung (HONDEX PS-7), Vorbereitung der Temperaturmessketten



Abbildung 38: Setzen der Boje, Einfädeln der Temperaturmesskette; Installation des Datenloggers und der Funkübertragungseinheit

Tabelle 9: Koordinaten der endgültigen Lage der Messbojen

| Boje-Nr. | Ostwert | Nordwert | Teufe |
|----------|---------|-----------|--------|
| JG-01 | 309 850 | 5 678 561 | 22,6 m |
| JG-02 | 310 894 | 5 680 209 | 19,1 m |
| JG-03 | 312 264 | 5 679 653 | 42,8 m |



Abbildung 39: Messboje JG-01



Abbildung 40: Manuelle Aufnahme von Temperaturtiefenprofilen

4.5 Monatliche manuelle Tiefenprofilmessung

Neben der automatischen Temperaturmessung wurden monatlich an vier Messpunkten (OW 01 bis OW 04, Tabelle 10) manuelle Tiefenprofile der Gewässertemperatur und der elektrischen Leitfähigkeit mit einer vertikalen Messpunktauflösung von $< 0,1$ m aufgenommen (Abbildung 40).

Messgerät: AquiTronic Multiparametersonde, Pegelstand, Leitfähigkeit und Temperatur, Kabel 50 m, Messtakt: 1 s

Tabelle 10: Koordinaten der Messpunkte für manuelle Tiefenprofile

| Messpunkt | Hochwert | Rechtswert |
|-----------|----------|------------|
| OW 1 | 312900 | 5679450 |
| OW 2 | 309850 | 5678560 |
| OW 3 | 310895 | 5680210 |
| OW 4 | 334000 | 5679775 |

In der ersten Messung im Juli 2020 lag die Wassertemperatur bis in 9 m Wassertiefe bei 20 °C bis 22 °C. Bis 20 m Wassertiefe folgte dann eine kontinuierliche Temperaturabnahme bis auf 9 °C. Im August kam es zur deutlichen Ausbildung einer Sprungschicht in ca. 12 m Tiefe. Innerhalb von 2 m änderte sich hier die Wassertemperatur von 19 °C auf 11 °C. Im September lag die Sprungschicht in 13 m Tiefe und im Oktober in einer Tiefe von 16 m.



In der Ende November 2020 durchgeführten Messung zeigte sich bereits die Auswirkung der Herbstzirkulation. Der gesamte Wasserkörper hatte eine relativ einheitliche Temperatur von 9 °C. In den folgenden Monaten kühlte das Gewässer weiter ab. Die niedrigste Temperatur wurde im Februar mit durchgehend ca. 4 °C erreicht. Ab März 2021 setzte dann durch Erwärmung der oberflächennahen Schichten wieder eine vertikale Temperaturschichtung ein.

Der Jahresgang der Temperaturtiefenprofile ist beispielhaft für OW 2 in Abbildung 41 zu sehen.

Abbildung 41: Temperaturtiefenprofile am Messpunkt OW 2 von Juli 2020 bis Mai 2021

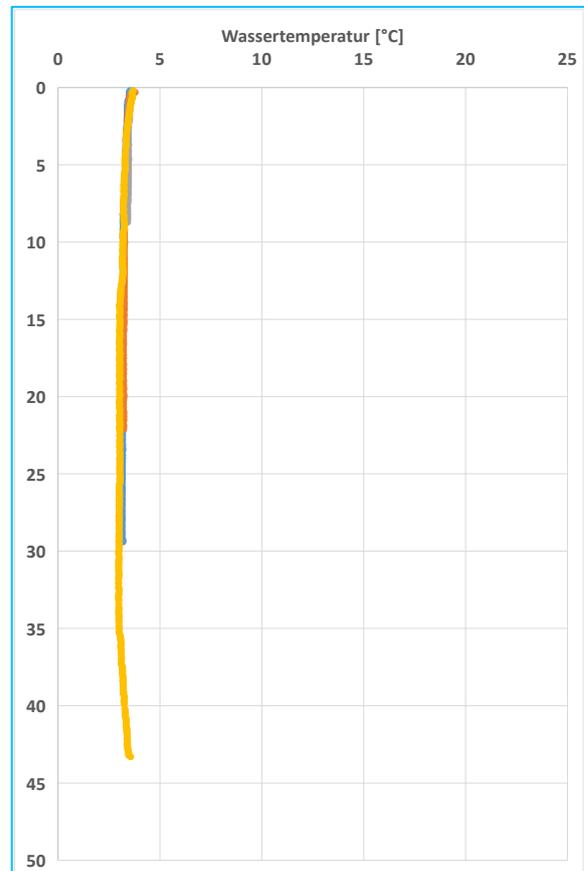
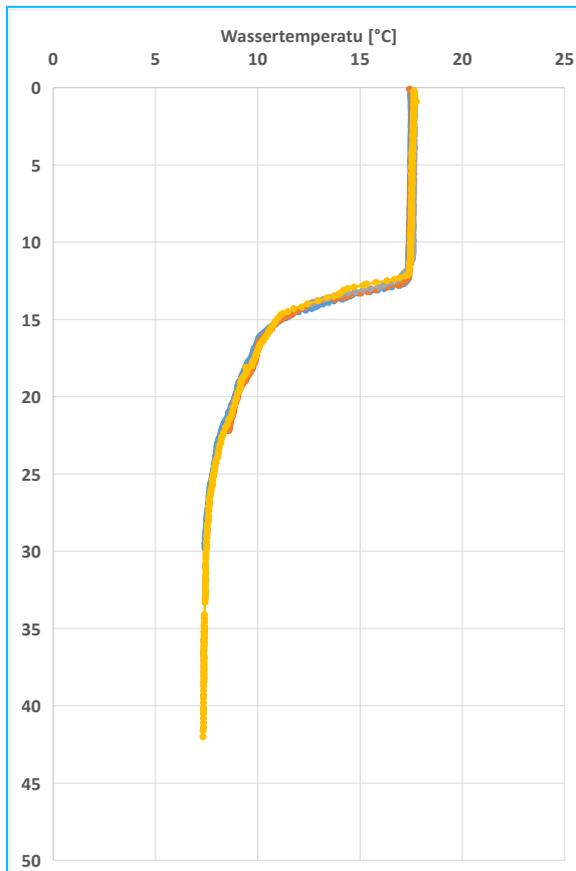
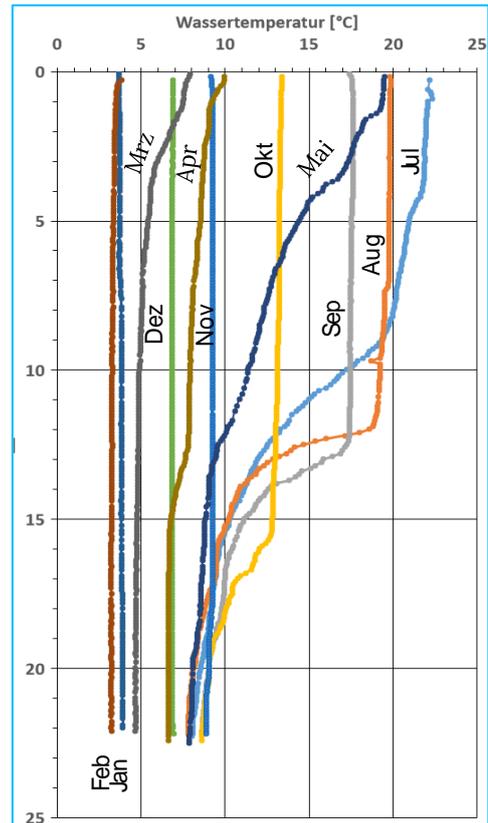


Abbildung 42: Temperaturtiefenprofile aller vier Messpunkte (OW 1 – OW 4); links September 2020, rechts Februar 2021

Die zu einem Zeitpunkt an verschiedenen Stellen im See aufgenommenen vertikalen Temperaturprofile weisen eine hohe Übereinstimmung auf. Die lateral homogene Temperaturverteilung wird in allen Messkampagnen bestätigt. In Abbildung 42 sind als Beispiel die Messungen vom September 2020 und Februar 2021 dargestellt.

4.6 Betrieb der automatischen Messstellen

Die Auslesung der Datenlogger der Temperaturmessbojen erfolgte monatlich im Rahmen der Seebefahrungen zur manuellen Profilmessung.

Im Oktober 2020 ist noch deutlich die Temperaturschichtung der Sommerstagnation zu erkennen. Im Teufenbereich von 0 bis 15 m liegt die Temperatur ca. 5 K über der Temperatur der tieferen Wasserschichten.

Nach der Herbstzirkulation ab 5. Dezember weist der gesamte Wasserkörper eine einheitliche Temperatur auf.

Im Februar 2021 konnte aufgrund der nahezu flächendeckenden Vereisung des Zwenkauer Sees das Phänomen der inversen Schichtung beobachtet werden (Abbildung 43).

Interessant ist die im Zeitraum Dezember bis Februar von allen anderen Messungen abweichende Temperatur des direkt auf dem Seeboden aufliegenden „50 m“-Sensors. Die um ca. 1 K höhere Temperatur der Gewässersohle ist wahrscheinlich auf den Zustrom wärmeren Grundwassers zurückzuführen. Auch die Anomalie einer signifikant niedrigeren elektrischen Leitfähigkeit unmittelbar über der Gewässersohle spricht für den Zustrom von Grundwasser.

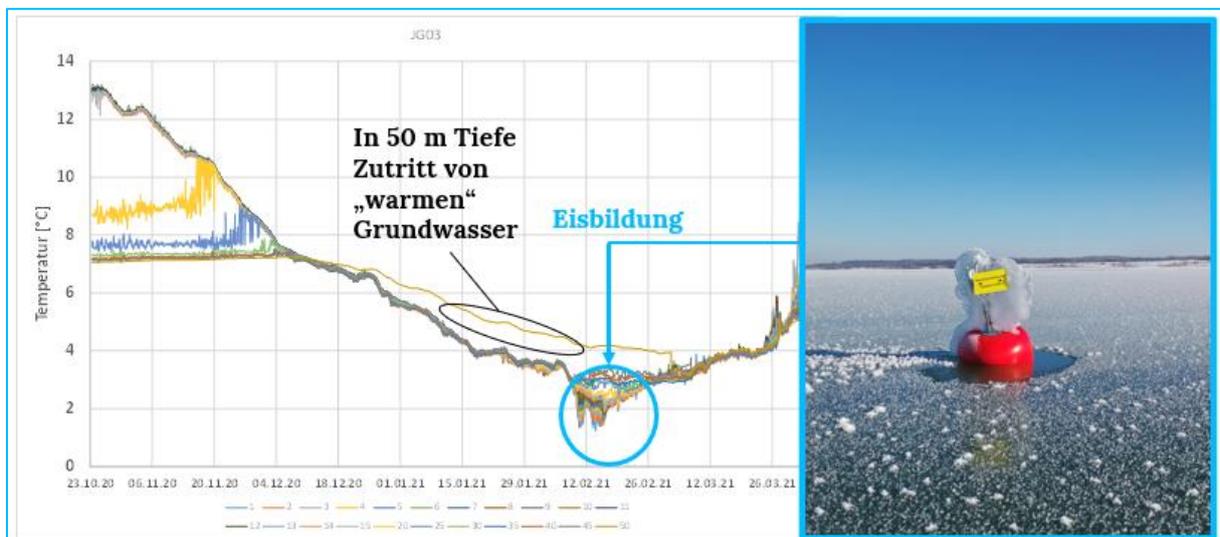


Abbildung 43: Ganglinien der 22 Temperatursensoren der Messstelle JG-03

4.7 Ergebnisse der Messdatenerfassung

Mit den zeitlich und räumlich hochauflösenden Temperaturmessungen konnten sowohl der jahreszeitliche Gang der Gewässertemperatur als auch kurzzeitige Temperaturänderungen sehr gut erfasst werden.

Die manuell aufgenommenen Temperaturprofile bestätigen die Messungen der automatischen Messbojen.

Als wesentlicher Einflussfaktor für kurzzeitige Änderungen der vertikalen Temperaturverteilung konnte die Windstärke identifiziert werden. Sturmereignisse können innerhalb weniger Stunden durch Wellengang und Strömung zur vollständigen Durchmischung und damit zum Temperatursausgleich bis in Tiefen von 20 m führen. Der Bereich von 20 m bis 45 m Tiefe weist dagegen, abgesehen vom jährlichen Temperaturgang, keine kurzzeitigen Temperaturschwankungen auf.

Unterhalb von 20 m Wassertiefe liegt die Wassertemperatur ganzjährig zwischen 2 °C und 9 °C; im oberflächennahen Bereich werden im Sommer bis 27 °C erreicht.

Als seltenes Phänomen konnte im Februar 2021 die Auswirkung eines vollständig zugefrorenen Sees auf die Temperaturschichtung aufgezeichnet werden.

Der in 45 m Tiefe auf der Gewässersohle gelegene Temperatursensor belegt im Winterhalbjahr eine Wärmezufuhr von der Gewässersohle, die wahrscheinlich auf den Zutritt von wärmerem Grundwasser zurückzuführen ist. Auch die Profilmessungen der elektrischen Messungen, die lokal geringmineralisierte Wasserlamellen an der Gewässerbasis belegt, spricht für Wasserzutritte aus dem Grundwasser.

Lateral ist die Temperaturverteilung im See sehr homogen. Die zu einem Zeitpunkt an verschiedenen Stellen im See aufgenommenen Temperaturtiefenprofile sind nahezu identisch.

4.8 Schlussfolgerungen für die Planung der Seethermie-Anlage

Aus der Temperaturverteilung im See ergeben sich keine Einschränkungen bzw. Vorzugsbereiche für die Lage der Entnahme und Einleitstelle.

Die Höhe der Entnahmestelle in Bezug auf die Wasseroberfläche ist wesentlich von der gewünschten Entnahmetemperatur abhängig. Sollen Schwankungen der Rohwassertemperatur vermieden werden, bietet sich die Entnahme unterhalb einer Wassertiefe von 20 m an. Der Bereich oberhalb von 20 m Wassertiefe hat dagegen den Vorteil eines höheren Temperaturniveaus während der Sommerstagnation.

Die Tiefe der Einleitstelle ist von der Temperatur des einzuleitenden Wassers und von der beabsichtigten Wirkung auf die Gewässerschichtung abhängig. Durch Einleitung in die der Temperatur des Einleitwassers entsprechende Gewässerschicht können dichtebedingte Zirkulationen vermieden werden. Ist zur Verbesserung der Gewässerqualität eine verstärkte Vertikalströmung gewünscht, kann dies durch eine möglichst hohe Differenz zwischen der Temperatur des Einleitwassers und der Gewässertemperatur an der Einleitstelle erreicht werden.

5 Limnologie

5.1 Gewässerökologische Grundlagen

5.1.1 Bedeutung der Temperatur für das Durchmischungsverhalten

Der Wärmehaushalt in Seen wird durch die Wärmeeinstrahlung der Sonne und durch den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre und dem Seeboden gesteuert. Hinzukommen kann eine Beeinflussung durch zuströmendes Grundwasser. Die Wassertemperatur unterliegt in Mitteleuropa entsprechend des wechselnden Energieeintrags durch die Sonne starken jahreszeitlichen Schwankungen. Während in den Sommermonaten oberflächennah Temperaturen von über 20 °C erreicht werden können, kommt es in den Wintermonaten in längeren Kälteperioden zur Eisbedeckung. Die Sommermonate sind bei tiefen Seen zudem geprägt von ausgeprägten Tiefengradienten der Temperatur und damit auch der Dichte des Wassers, was zur Ausbildung einer sommerlichen Temperaturschichtung mit der Ausbildung von zwei weitgehend isolierten Wasserkörpern führt.

Ein wesentlicher Faktor der Ökosystemeigenschaften von Seen ist dabei die Abhängigkeit der Dichte des Wassers von der Temperatur, wobei die Dichte mit steigender Temperatur (> 4 °C) abnimmt. Von besonderer Bedeutung ist die Dichteanomalie des Wassers, das bei rund 4 °C sein Dichtemaximum aufweist und mit sinkender Temperatur wieder leichter wird, bevor es zu Eis erstarrt. Eis hat eine deutlich geringere Dichte als Wasser und schwimmt deshalb auf.

Die temperaturabhängigen Dichteunterschiede sorgen dafür, dass es in tieferen Seen im Frühjahr mit zunehmender Erwärmung des Wasserkörpers von der Oberfläche her zu einer Temperatur- und Dichteschichtung und damit zur Ausbildung einer Sommerstagnation kommt. Unterhalb der warmen oberflächennahen Wasserschicht von wenigen Metern Mächtigkeit, dem sogenannten Epilimnion, befindet sich das kalte und damit schwerere Tiefenwasser. Es bildet das sogenannte Hypolimnion. Der unterschiedlich mächtig ausgeprägte Übergangsbereich zwischen dem Epilimnion und dem Hypolimnion mit einem starken Temperaturgradienten innerhalb weniger Meter wird als Metalimnion bezeichnet. Die sogenannte Thermokline (Temperaturscheide) innerhalb des Metalimnions ist der Bereich mit der größten Temperaturveränderung. Mit Angleichung der Temperaturen der beiden Wasserkörper im Herbst kommt es zur Herbstvollzirkulation, die anhält, solange sich auf dem See keine Eisschicht ausbildet. Eine Eisbedeckung hat eine Winterstagnation mit nur geringen Durchmischungen des Wasserkörpers zur Folge, die nach dem Eisaufbruch in die Frühjahrszirkulation übergeht (Abbildung 44) (Nützmann und Moser 2016).

Die Temperatur des Hypolimnions während der Sommerstagnation wird dabei zu einem großen Teil von der Tiefe des Sees und von den Witterungsverhältnissen beim Einsetzen der Sommerstagnation bestimmt. Daraus ergibt sich eine Spanne der Tiefenwassertemperatur während des Sommers von ca. 4 bis 10 °C.

Flache Seen von nur wenigen Metern Tiefe zeigen nur kurzzeitig Temperatur- und Dichtegradienten in der Wassersäule im Lauf des Jahres, da bei ihnen der Wind in der Lage ist, den Wasserkörper fast ständig umzuwälzen. Sie zeigen ein polymiktisches Durchmischungsverhalten.

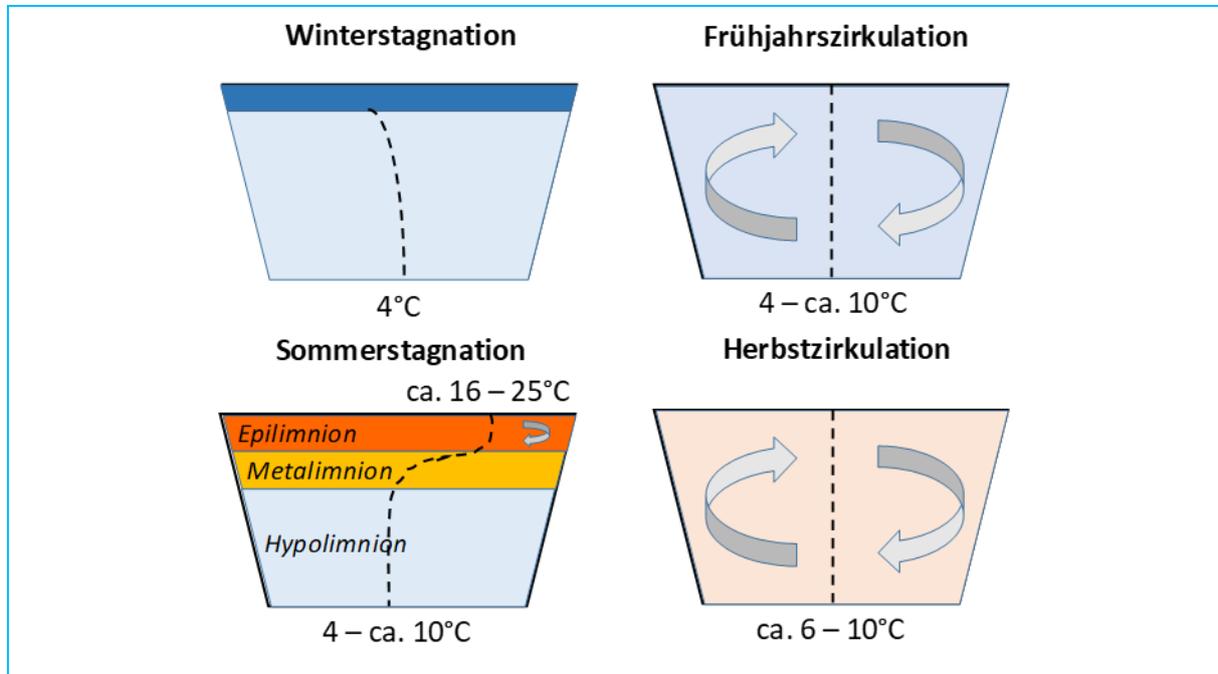


Abbildung 44: Idealisierter Ablauf der thermischen Schichtung in einem tiefen See in Mitteleuropa vom Winter bis zum Herbst (dimiktischer Schichtungstyp der gemäßigten Breiten), eigene Grafik der Autoren

5.1.2 Sauerstoffhaushalt von Seen

Das Leben höherer Organismen ist stark von der Verfügbarkeit an Sauerstoff abhängig. Die Löslichkeit von Sauerstoff in Wasser ist wiederum temperaturabhängig und umso höher, je niedriger die Wassertemperatur ist. Während Wasser mit einer Temperatur von 4°C rund 13 mg/l an Sauerstoff aufnehmen kann, wird die Sauerstoffsättigung in 25°C warmem Wasser bereits bei $\text{ca. } 8 \text{ mg/l}$ erreicht. Quellen des Sauerstoffeintrags in Gewässern sind der Austausch mit der Atmosphäre sowie die Sauerstofffreisetzung durch die Photosynthese von Pflanzen (Makrophyten und Algen). Damit beschränkt sich der Sauerstoffeintrag in einen geschichteten See auf den oberflächennahen Bereich, da nur das Epilimnion Kontakt zur Atmosphäre hat und nur dort und ggf. noch in den obersten Bereichen des Hypolimnions ausreichend Lichtenergie für die Photosynthese zur Verfügung steht. Im Hypolimnion dominieren insgesamt sauerstoffzehrende Abbauprozesse, die die Sauerstoffkonzentration während der Schichtungsperiode kontinuierlich verringern (Hupfer et al. 1995). Die Rate des Sauerstoffverbrauchs ist dabei in Bergbauseen nicht nur von der Verfügbarkeit mikrobiell abbaubarer organischer Substanzen, sondern auch von der Intensität chemischer Oxidationsprozesse (insbesondere der Eisenoxidation) abhängig. Zusätzlich kann der Zustrom anoxischen Grundwassers einen Einfluss haben.

Die Sauerstoffkonzentration bestimmt die Redoxverhältnisse im Hypolimnion. Niedrige Redoxpotenziale können eine Reihe chemischer Reaktionen zur Folge haben, die zur Freisetzung von Nährstoffen aus dem Sediment und zur Bildung toxischer Stoffe führen können. Die von Fischen wie auch anderen Organismengruppen tolerierten Sauerstoffkonzentrationsminima sind artspezifisch. Die höchsten Sauerstoffkonzentrationen benötigen Salmoniden mit mindestens 6 – 7 mg/l. Andere Arten kommen mit deutlich niedrigeren Konzentrationen zurecht. Grundsätzlich ist die Besiedlung eines Gewässers oder eines Teillebensraums in einem See wie dem Hypolimnion durch Fische aber nur möglich, wenn die Sauerstoffkonzentrationen dauerhaft über ca. 3 mg/l liegen (Baur und Rapp 2002).

5.1.3 Nährstoffe und Trophie

Die Besiedlung sowohl des Freiwassers (Pelagial), der Uferbereiche (Litoral) und der Bodenbereiche (Benthal) sowie die saisonale Sukzession der Organismen im See sind stark von der Verfügbarkeit an Nährstoffen (primär Phosphor und Stickstoff) und vom Licht abhängig. Während im Pelagial Algen die Primärproduzenten stellen, dominieren im Litoral in der Regel Makrophyten.

In Abhängigkeit von der Verfügbarkeit an Nährstoffen für die Primärproduktion weisen Seen einen bestimmten trophischen Zustand auf, der von oligotroph über mesotroph bis eutroph und hypertroph reicht (Abbildung 45). Während Flachseen natürlicherweise überwiegend eutroph sind, liegt der Referenzzustand tiefer Seen, wie beim Zwenkauer See, im oligo- bis mesotrophen Bereich (Mischke et al. 2015). Ein hoher Trophiegrad bedeutet entsprechend eine hohe pflanzliche Biomasse im Pelagial, die in Abhängigkeit von der mit der Tiefe abnehmenden Lichtverfügbarkeit in den oberen bis mittleren Wasserschichten anzutreffen ist.

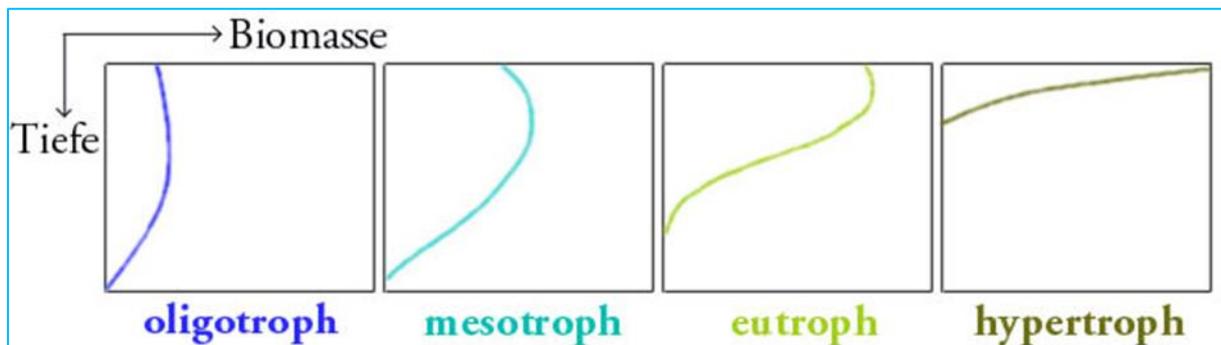


Abbildung 45: Relative Algenbiomasse und ihre Tiefenverteilung in Seen mit unterschiedlichem Trophiegrad (wikipedia 2021).

Das Hypolimnion geschichteter Seen wirkt als Nährstofffalle. Die aus dem Epilimnion sedimentierende abgestorbene Biomasse wird hier durch Mikroorganismen abgebaut. Dabei werden die von den Pflanzen aufgenommenen anorganischen Nährstoffe wieder freigesetzt. Aufgrund des geringen Lichtangebots findet im Hypolimnion eutropher Seen keine oder nur eine sehr geringe Photosynthese statt. Der freigesetzte Phosphor wird hier zu einem großen Teil im Sediment an Metalle (insbesondere Eisen) gebunden, solange diese in oxidierter Form vorliegen.

Das Auflösen der sommerlichen Schichtung transportiert Nährstoffe in die durchlichteten oberen Wasserschichten, was eine Intensivierung der Primärproduktion bewirken

kann. Bei der natürlichen Herbstzirkulation tritt dieser Effekt aufgrund des deutlich verringerten Lichtangebots aber nur begrenzt auf (Hupfer et al. 1995).

5.2 Limnophysikalisches Modell für den Zwenkauer See

5.2.1 Morphologische Analyse des Seebeckens

Die Auskohlung des Tagebaus wurde 1999 beendet. Die Flutung mit Sumpfungswasser aus den noch aktiven Tagebauen im Mitteldeutschen Revier begann am 09.03.2007 und wird erst im Jahr 2038 nach Abschluss aller Bau- und Sicherungsmaßnahmen abgeschlossen werden. Während eines Hochwassers in der Weißen Elster im Juni 2013 wurden dem See zudem größere Mengen Flusswasser zugeführt. Seit 2015 wird der Endwasserstand bereits zu über 90 % erreicht. Das Becken des Zwenkauer Sees (Abbildung 46 und Abbildung 48) zeichnet sich durch eine große, freie, westliche Wasserfläche aus, die sich nach Osten hin verjüngt und in einem rechten Winkel nach Süden hin in ein schmales langgezogenes Becken übergeht. Entlang des gesamten südlichen Randes erstreckt sich bis in das östliche Teilbecken hinein der tiefe Randschlauch des ehemaligen Tagesbaus, in dem die maximalen Wassertiefen erreicht werden. Der sich im Hauptbecken nördlich anschließende, deutlich flachere Bereich wird von Kippenstrukturen mit ihren von Ost nach West verlaufenden Rippen geprägt. Aber auch hier liegen die Wassertiefen überwiegend bei über ca. 8 – 10 m. Die Struktur des Seebeckens spiegelt sich in den morphometrischen Kennlinien (Abbildung 47) wider.

Tabelle 11: Morphometrische Kennwerte des Zwenkauer Sees

| Kennwert | Kürzel bzw. Formel | Einheit | Zwenkauer See |
|---|---|---------------------|-----------------|
| Wasserstand | | m NHN | +113,1 – +113,8 |
| Seevolumen | V | Mio. m ³ | 172 – 178 |
| Seefläche | A | ha | 952 – 981 |
| Maximale Tiefe | z_{\max} | m | 49,4 – 50,1 |
| Mittlere Tiefe | $z_m = \frac{V}{A}$ | m | 18,1 |
| Effektive Länge | L_{eff} | km | 5,3 |
| Effektive Breite | B_{eff} | km | 2,6 |
| Effektive Achsenlänge | $D_a = 0,5 \cdot (L_{\text{eff}} + B_{\text{eff}})$ | km | 4,0 |
| Theoretische Epilimniontiefe | $z_{\text{epi}} = 5,81 \cdot D_a^{0,28}$ | m | 8,5 |
| Tiefengradient | $F = \frac{z_{\max}}{4,785 \cdot (L_{\text{eff}} + B_{\text{eff}})^{0,28}}$ | - | 5,7 |
| Theoretische Wasser-aufenthaltszeit ohne Speicherbewirtschaftung | $\tau = \frac{V}{\text{Abfluss}}$ | a | ca. 26 |

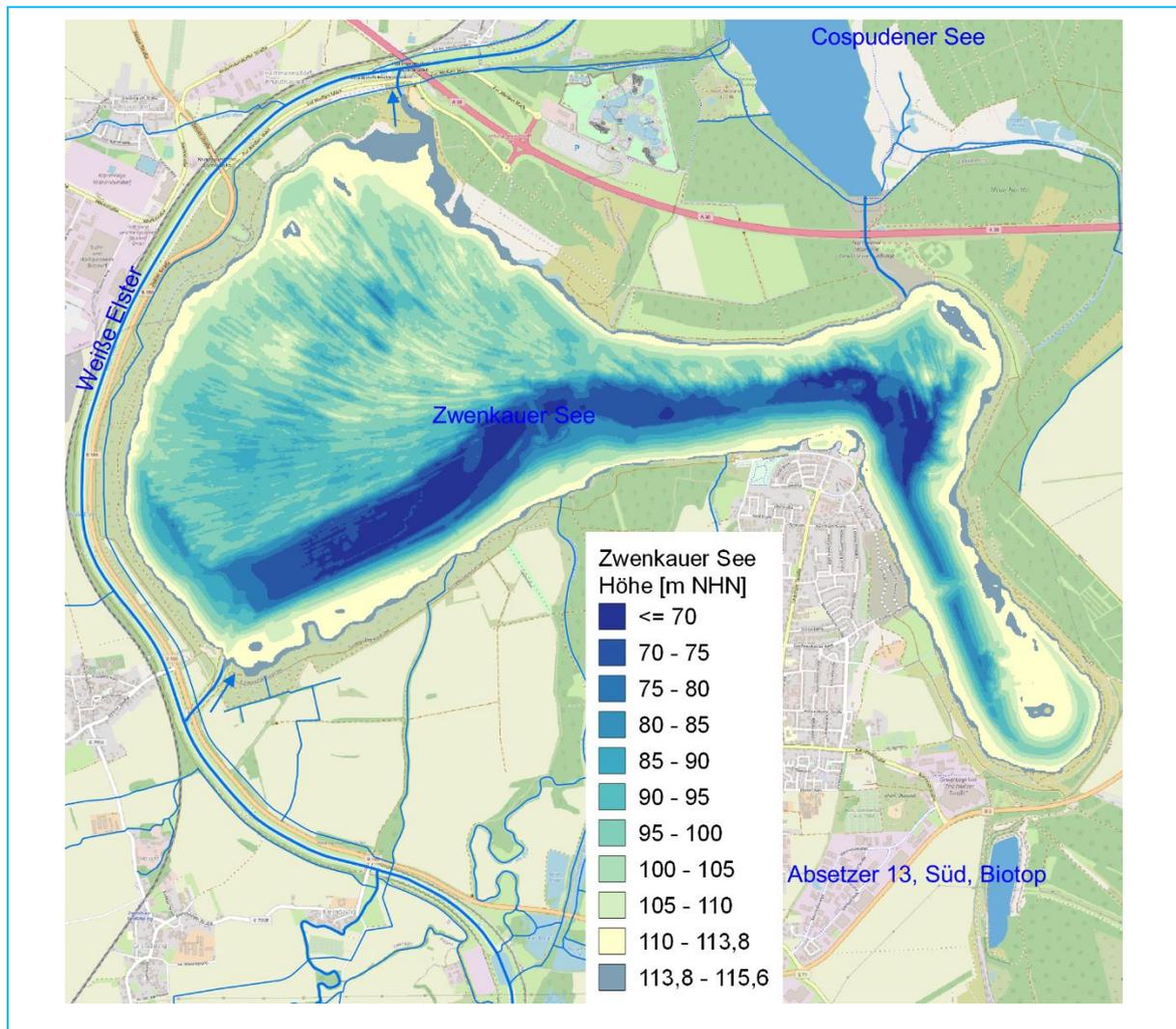


Abbildung 46: Morphometrie des Zwenkauer Sees (eigene Darstellung IWB unter Nutzung zur Verfügung gestellter Daten)

Für den Zwenkauer See ist eine Staulamelle zwischen +113,1 und +113,8 m NHN vorgesehen. Der Zwenkauer See hat damit ein Seevolumen von 171,5 bis 178,3 Mio. m³ und eine Seefläche zwischen 952 und 981 ha. Zusätzlich besitzt der Zwenkauer See einen Hochwasserschutzraum für die Weiße Elster zwischen +113,8 m NHN und +115,6 m NHN mit einem Volumen von 18,5 Mio. m³ (LMBV mbH 2021b). Der Wasserstand des Zwenkauer Sees lag im März 2021 bei +112,6 m NHN, d. h. einen halben Meter unter dem unteren Stauziel.

Auf der Grundlage der in Abbildung 46 dargestellten Morphometrie ergeben sich die in Abbildung 47 gezeigten Wasserstand-Volumen- und Wasserstand-Flächen-Kennlinien.

Aus Volumen und Fläche des Sees ergibt sich eine mittlere Seetiefe von 18 m (Tabelle 11). Der hohe Wert von 5,7 für den Tiefengradienten weist auf die Ausbildung einer sehr stabilen sommerlichen Schichtung des Wasserkörpers hin. Basierend auf der effektiven Länge und Breite des Sees errechnet sich eine theoretische Epilimniontiefe von 8,5 m, so dass der Flächenanteil mit einer sommerlichen Schichtung des Seewasserkörpers ca. 80 % der Seefläche umfassen sollte.

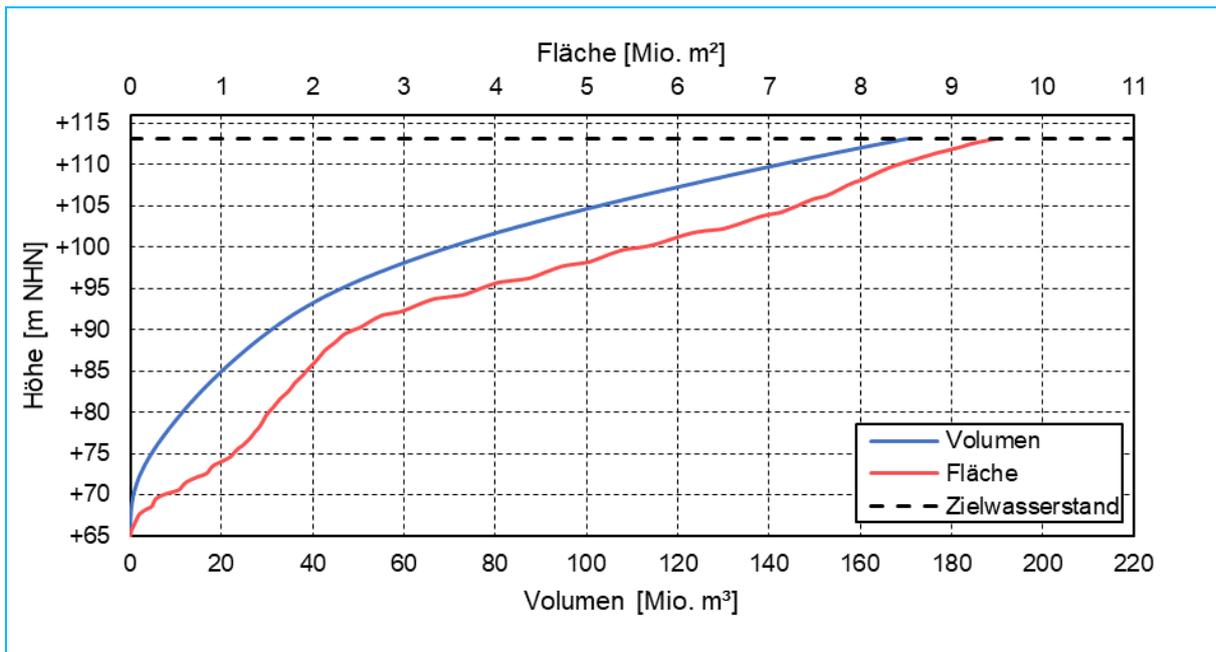


Abbildung 47: Morphometrische Kennlinien des Zwenkauer Sees (eigene Darstellung IWB unter Nutzung zur Verfügung gestellter Daten)

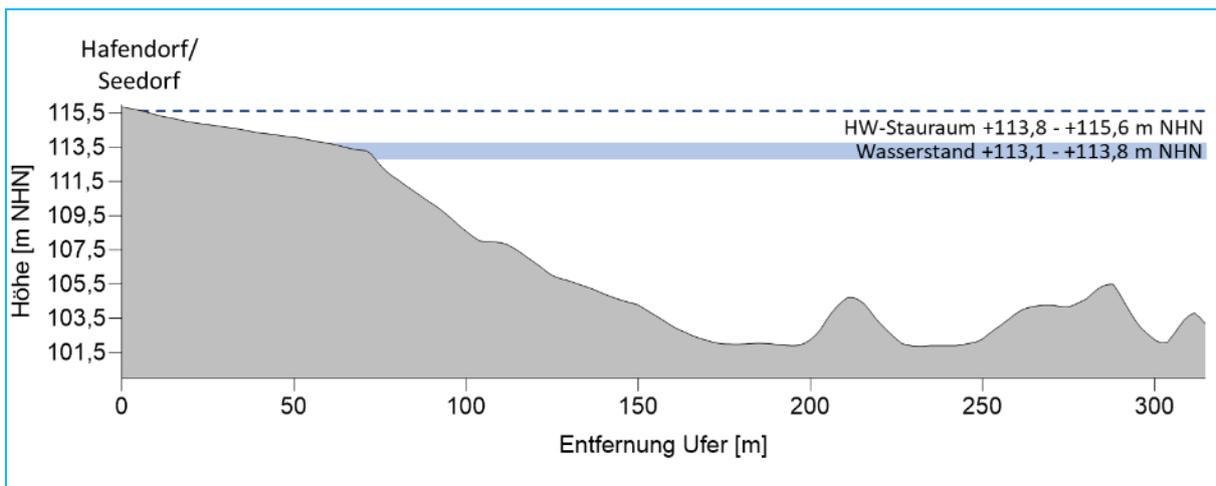


Abbildung 48: Tiefenschnitt des Zwenkauer Sees in der Nähe des Hafen- und Seedorfes mit siebenfacher Überhöhung (eigene Darstellung IWB unter Nutzung zur Verfügung gestellter Daten)

Die Wasseraufenthaltszeit wird durch die ober- und unterirdischen Zu- und Abflüsse bestimmt. Ohne die Nutzung als Hochwasserschutzspeicher für die Weiße Elster ergibt sich aus der Wasserbilanz eine hohe Wasseraufenthaltszeit von ca. 26 Jahren. Der zusätzliche Speicherraum umfasst ca. 10 % des Seevolumens. Je nach Häufigkeit seiner Inanspruchnahme kann es zu einer Verringerung der Wasseraufenthaltszeit um einige Jahre kommen.

5.2.2 Referenzseetyp zum Zwenkauer See

Der Zwenkauer See ist auf Basis seiner morphometrischen und hydrologischen Kennwerte dem Seetyp 13 der deutschen Seentypologie nach (Riedmüller et al. 2013) zuzuordnen.

Der Seetyp 13 ist typisch für das zentraleuropäische Tiefland. Seen des Typs sind verbreitet in der Jungmoränenlandschaft der norddeutschen Tiefebene mit ihren Sandern, Grund- und Endmoränen zu finden. Dazu gehören auch viele Bagger- und Tagebaurestseen. Natürliche Seen des Typs weisen meist mittlere Tiefen zwischen 3 und 30 m auf. Die sommerliche Stagnationsperiode dauert länger als drei Monate. Die Verweilzeit des Wassers liegt in ihnen bei 1 bis mehr als 10 Jahren, wobei der Wasserzufluss zum überwiegenden Teil über die Grundwasserleiter erfolgt. Das Verhältnis von Einzugsgebiet zu Volumen ist kleiner als $1,5 \text{ m}^{-1}$.

Die Calciumkonzentration beträgt mehr als 15 mg/l . Die elektrische Leitfähigkeit liegt im Bereich zwischen 100 und $600 \text{ }\mu\text{S/cm}$, der pH-Wert im neutralen bis schwach alkalischen Bereich. Das Substrat wird von Feinsedimenten dominiert (Riedmüller et al. 2013).

In ihrem Referenzzustand liegen Seen des Typs 13 im Trophiespektrum im oligotrophen bis schwach mesotrophen (mesotroph 1) Bereich (Trophie-Index $< 1,75$). Im Mittel der Vegetationsperiode (März – Oktober) ergeben sich entsprechend Chlorophyll a-Konzentrationen $< 4 \text{ }\mu\text{g/l}$. Die mittlere Sichttiefe ist größer als $3,5 \text{ m}$. Grundlage für die natürlicherweise niedrige Produktivität der Seen sind niedrige Konzentrationen der Pflanzennährstoffe Phosphor (Gesamt-Phosphor Saisonmittel $< 22 \text{ }\mu\text{g/l}$) und Stickstoff (Gesamt-Stickstoff $< 1 \text{ mg/l}$), die keine höhere Primärproduktion ermöglichen (Riedmüller et al. 2013).

Die geringe Produktivität des Gewässers führt zu weitgehend stabilen Sauerstoffkonzentrationen im Hypolimnion während der Sommerstagnation mit allenfalls nur geringen Rückgängen zum Ende der Schichtungsperiode. Nahe der Oberfläche und insbesondere im Metalimnion können Sauerstoffübersättigungen durch die Einschichtung von Algen in diesem Tiefenbereich mit besserem Nährstoff- oder Lichtangebot auftreten.

5.2.3 Meteorologische Daten

Die Auswirkungen der thermischen Seewassernutzung werden in der vorliegenden Bearbeitung mit einem limnophysikalischen Modell abgebildet (siehe Abschnitt 5.2.6). Damit werden die räumlichen Temperaturveränderungen im See bei der Entnahme und Rückleitung von Wasser aus bzw. in unterschiedliche Tiefen betrachtet. Gleichzeitig wird der Einfluss auf die Stabilität der thermischen Schichtung und den Sauerstoffhaushalt geprüft. Als Simulator wird das zweidimensionale Modell CE-QUAL-W2 (Cole und Wells 2021) verwendet.

Das limnophysikalische Modell CE-QUAL-W2 (siehe Abschnitt 5.2.6) benötigt die in der Tabelle 12 bezeichneten meteorologischen Eingangsdaten. Zu Prognosezwecken können dazu grundsätzlich gemessene Daten einer nahen Wetterstation oder alternativ die Ergebnisse eines Klimamodells verwendet werden. Der Vorteil gemessener Daten liegt in ihrer hohen zeitlichen Auflösung als 10-Minutenwerte oder als Stundenwerte.

Die standortnächste Wetterstation ist die Station Leipzig-Holzhausen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in etwa 12 km Entfernung nordöstlich vom Zwenkauer See. Die Station Leipzig-Holzhausen befindet sich auf einer Höhe von +138 m NN. Die meteorologischen Daten liegen von 2010 bis 2021 überwiegend als 10-Minutenwerte und der Bedeckungsgrad als Stundenwerte vor. Für die Bearbeitung werden die Jahre von 2011 bis 2021 verwendet.

Tabelle 12: Meteorologische Kennwerte und ihre zeitliche Auflösung.

| Kennwert | Einheit | Zeitliche Auflösung |
|-----------------------------------|----------------|----------------------------|
| Lufttemperatur in 2 m Höhe | °C | 10-Minutenwerte |
| Taupunkttemperatur | °C | 10-Minutenwerte |
| Windstärke in 2 m Höhe | m/s | 10-Minutenwerte |
| Windrichtung in 2 m Höhe | Grad | 10-Minutenwerte |
| Bedeckungsgrad | Zehntel | Stundenwerte |
| Niederschlag | mm | 10-Minutenwerte |

Aus den Niederschlägen der zehnjährigen Reihe der DWD-Station Leipzig-Holzhausen und der nach (DVWK 1996) berechneten Gewässerverdunstung für Seen mit einer mittleren Tiefe von 18 m (Tabelle 11) errechnet sich eine mittlere klimatische Wasserbilanz für den Zwenkauer See von -85 mm/a (Abbildung 49). Die klimatische Wasserbilanz über der Seefläche ist damit im langjährigen Mittel defizitär.

Die verwendete Datenreihe der klimatischen Wasserbilanz enthält sowohl stark defizitäre als auch stark überschüssige Jahre. So war die klimatische Wasserbilanz in den hydrologischen Jahren 2012 sowie von 2018 bis 2020 stark defizitär. Die jährliche Gewässerverdunstung überstieg die Niederschlagsmenge im Einzelfall um mehr als 400 mm. Die hydrologischen Jahre 2011 und 2013 wiesen dagegen einen Überschuss der Niederschläge gegenüber der Gewässerverdunstung auf, der im Jahr 2013 mit rund 275 mm besonders hoch ausfiel. Die zehnjährige Datenreihe der DWD-Station Leipzig-Holzhausen ist aufgrund ihrer Vielfalt damit sehr gut geeignet, die möglichen hydrometeorologischen Ereignisse, die auf die Wasserbilanz des Zwenkauer Sees einwirken, sowohl im Mittel als auch in ihren Abweichungen abzubilden.

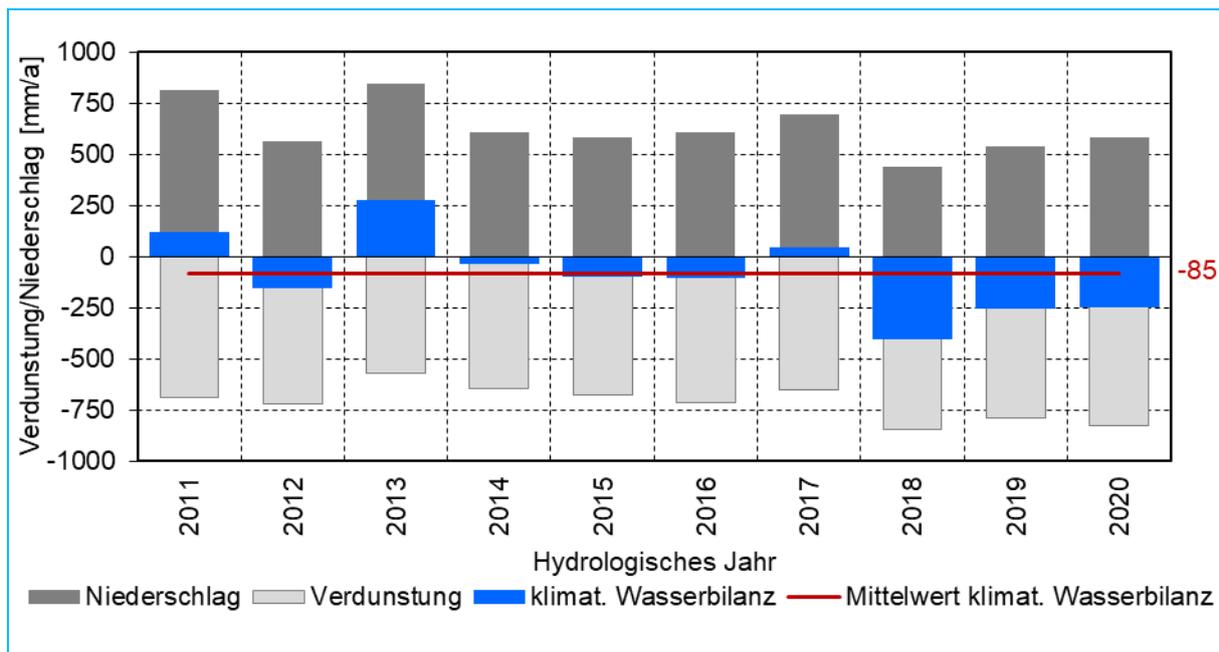


Abbildung 49: Klimatische Wasserbilanz des Zwenkauer Sees mit einer mittleren Tiefe von 18 m, berechnet auf der Grundlage der meteorologischen Messreihe von 2011 bis 2020 der DWD-Station Leipzig-Holzhausen

5.2.4 Wasserbilanz

Die Flutung des Zwenkauer Sees wurde im Jahr 2007 begonnen. Der Zwenkauer See ist bei einem derzeitigen Wasserstand von +112,6 m NHN zu ca. 95 % gefüllt (LMBV mbH 2021a). Die Flutung erfolgte vorzugsweise aus der Weißen Elster und aus dem Tagebau Profen.

Von der LMBV wurden Wasserbilanzen des Ausgangszustandes (IBGW 2021) und des zukünftigen stationären Zustandes (IBGW 2019) zur Verfügung gestellt. Diese Wasserbilanzen mussten durch den Abgleich mit den meteorologischen Daten (siehe Abschnitt 5.2.3) geringfügig angepasst werden und sind in Abbildung 50 dargestellt. Für die Simulation des Ausgangszustandes (Abbildung 50 oben) wurde der Zeitraum vom 01.04.2015 bis 01.04.2021 gewählt. In diesem Zeitraum war der Wasserstand mit +112,5 m NHN weitgehend stabil. Im Prognosezeitraum (Abbildung 50 unten) ist die Flutung des Zwenkauer Sees abgeschlossen und der Wasserstand liegt bei etwa +113,5 m NHN. Die Schwankungen des Wasserspiegels sind auf die Verwendung der meteorologischen Zeitreihe von 2011 bis 2021 zurückzuführen. Die konsistente Zeitreihe der hydrometeorologischen Daten von 2011 bis 2021 wird als hydrologische Modelljahre verwendet (siehe Abschnitt 5.3.2).

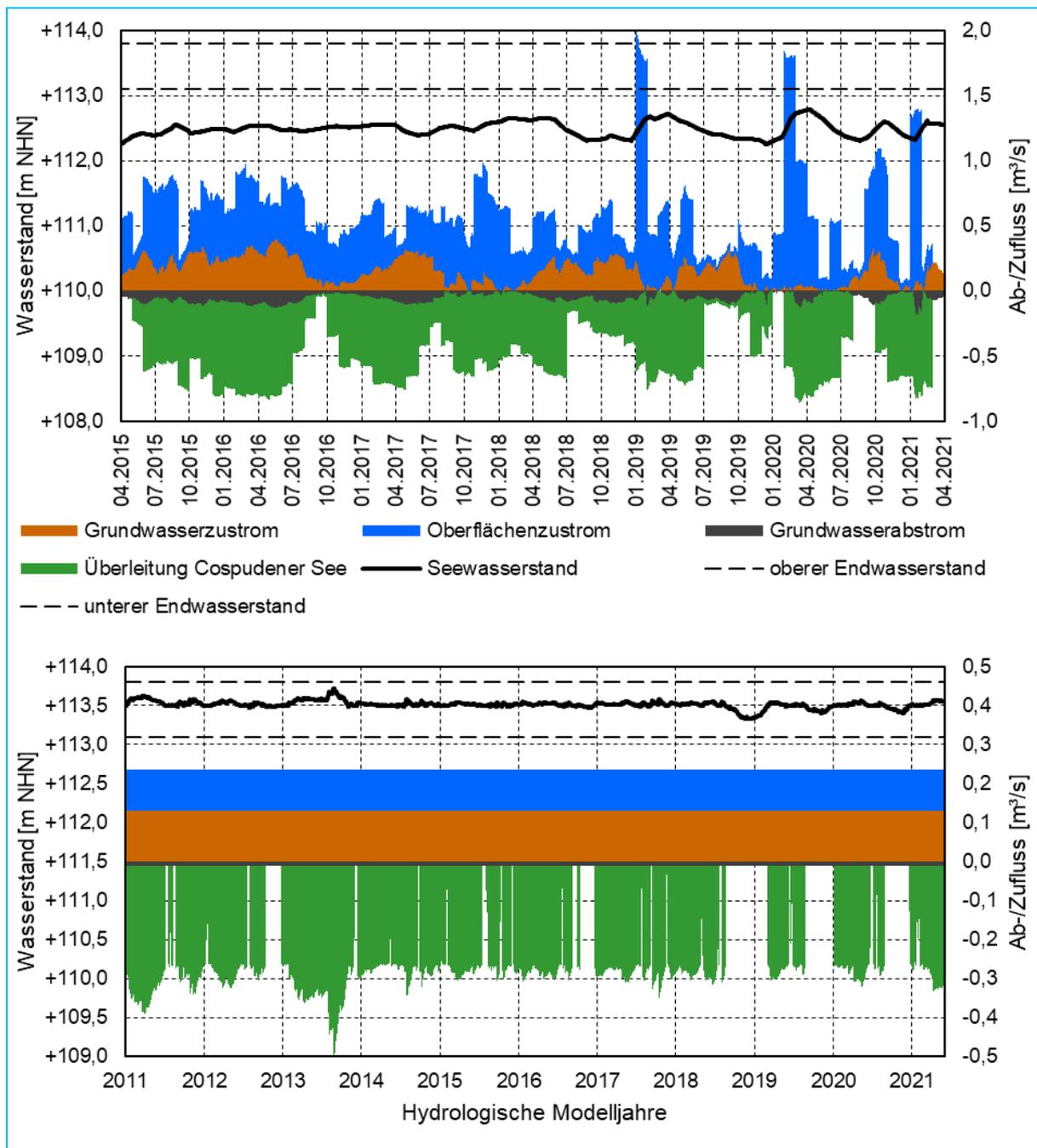


Abbildung 50: Wasserbilanz des Zwenkauer Sees für den Anpassungszeitraum von 2015 bis 2021 (oben) und für die Prognosevariante ohne Wärmepumpenbetrieb (unten) (eigene Darstellung IWB unter Nutzung zur Verfügung gestellter Daten der LMBV)

5.2.5 Wasserbeschaffenheiten

5.2.5.1 Aktuelle Wasserbeschaffenheit

Die Wasserbeschaffenheit des Zwenkauer Sees zeichnet sich gemäß den Ergebnissen des Monitorings durch das LfLUG (Tabelle 13) durch hohe Konzentrationen an gelösten Ionen aus, wie dies in dem sehr hohen Wert für die elektrische Leitfähigkeit von 1.990 $\mu\text{S}/\text{cm}$ zum Ausdruck kommt. Die Werte beruhen vor allem auf hohen Konzentrationen an Sulfat, welches Konzentrationen von über 1.000 mg/l aufweist, und Calcium. Hierin spiegelt sich der Ursprung des zur Flutung verwendeten Wassers aus der Sümpfung der noch aktiven Tagebaue wider.

Die pH-Werte bewegen sich jedoch durchgehend im neutralen Bereich und die Eisenkonzentrationen im Freiwasser sind sehr niedrig, wohingegen das Sediment mit im Mittel 110 g/kg sehr eisenreich ist.

Bei den Konzentrationen der beiden wichtigen Pflanzennährstoffe Phosphor und Stickstoff wurden im Jahr 2017 beim Gesamt-Phosphor Werte zwischen 6,1 und 21 $\mu\text{g}/\text{l}$ gemessen. Mit einem Mittelwert von 11,6 $\mu\text{g}/\text{l}$ liegt der Zwenkauer See in einem Bereich, der für oligotrophe Seen typisch ist. Ebenso wie die Phosphorkonzentrationen bewegen sich die Konzentrationen für Stickstoff im Bereich der Werte für natürliche Referenzseen.

Entsprechend der geringen Verfügbarkeit an Nährstoffen wurde 2017 nur ein Mittelwert der Chlorophyll-a-Konzentrationen während der Vegetationsperiode von 1,1 $\mu\text{g}/\text{l}$ und im Gesamtjahr von 0,8 $\mu\text{g}/\text{l}$ erreicht, wobei die Werte im Epilimnion zwischen 2 und 3 $\mu\text{g}/\text{l}$ lagen. Auch dies entspricht dem seetypspezifischen Referenzwert natürlicher Seen.

Tabelle 13: Mittelwerte hydrochemischer und –physikalischer Parameter des Zwenkauer Sees aus dem Jahr 2017 (LfLUG 2021).

| | | |
|--|-------------------------|------------|
| pH | - | 6,6 |
| Säurekapazität $K_{\text{S}4,3}$ | mmol/l | 0,27 |
| el. Leitfähigkeit | $\mu\text{S}/\text{cm}$ | 1.990 |
| Sulfat | mg/l | 1.069 |
| Eisen | mg/l | < 0,1 |
| Calcium | mg/l | 345 |
| anorg. Stickstoff | mg/l | 1,12 |
| Gesamt-Phosphor | $\mu\text{g}/\text{l}$ | 11,6 |

Die Tiefenprofilmessungen der Sauerstoffkonzentrationen zeigten beim intensiven Monitoring des Sees im Jahr 2017 durchgehend Werte an, die weitgehend im Sättigungsbereich lagen. Die Spanne reichte von rund 80 % Sättigung im Minimum über Grund bis rund 110 % im Maximum im oberflächennahen Bereich. Als Mittelwert ergaben sich 99 % (LfLUG 2021).

5.2.5.2 Wasserbeschaffenheiten für die limnophysikalische Modellierung

Für das limnophysikalische Modell sind als Mindestanspruch die Wassertemperatur und die Salinität zu definieren. Mit dem Modell können weitere physikalisch-chemische Kennwerte abgebildet werden. Im konkreten Fall war es erforderlich, die Betrachtungen auf den Kennwert Sauerstoff zu erweitern.

Für die Temperatur der Oberflächenzuflüsse wurde aus der gemessenen Lufttemperatur der DWD-Station Leipzig-Holzhausen (Abschnitt 5.2.3) und den gemessenen Wassertemperaturen der Oberflächenzuflüsse eine Zeitreihe von 2010 bis 2021 synthetisch erzeugt. Für den Niederschlag wurde das Tagesmittel der gemessenen Feuchtetemperatur an der Wetterstation Leipzig-Holzhausen verwendet. Für die Temperatur des zuströmenden Grundwassers wurde in guter Näherung im Schnitt 12 °C angenommen.

Sauerstoff gelangt primär durch Diffusion an der Grenzfläche Seewasser/Atmosphäre in den See und ist insbesondere von der Windgeschwindigkeit und der Schichtungsstabilität der obersten Wasserschicht im See abhängig (sogenannte Eddy-Diffusion). Der konvektive Sauerstoffeintrag mit Niederschlägen und Zuflüssen sowie der Sauerstoffeintrag durch intrinsische Produktion infolge photosynthetischer Prozesse sind demgegenüber vernachlässigbar gering. Modellseitig wurde für den Niederschlag und für die Oberflächenwasserzuflüsse eine Sauerstoffsättigung von 100 % angenommen. Der Grundwasserzufluss wird als sauerstofffrei betrachtet.

Die Sulfatkonzentration sowie die Salinität der Oberflächenwasser- und Grundwasserzuströme basieren auf Messwerten der LMBV für den Zeitraum von 2010 bis 2021.

5.2.6 Modellsystem und Modelldiskretisierung

Die Prognose des Einflusses des Wärmepumpenbetriebs auf den Zwenkauer See, d. h. insbesondere seiner Temperaturschichtung und seines Sauerstoffhaushaltes, erfolgt mithilfe des Modellsystems CE-QUAL-W2 (Cole und Wells 2021). CE-QUAL-W2 ist ein volumentreues, zweidimensional vertikalebene Modell zur Simulation der Hydrodynamik und Wasserbeschaffenheit von Flüssen, Seen und Stauseen.

Die Simulation der Hydrodynamik umfasst standardmäßig den Wasserstand, die Strömungsgeschwindigkeiten und die Wassertemperaturen einschließlich der Eisbedeckung. Zur Modellierung der Wasserbeschaffenheit können verschiedene Module eingebunden werden, die vorrangig auf limnobiologische Fragestellungen wie den Sauerstoff- und Nährstoffhaushalt sowie die Primärproduktion zielen.

Das limnophysikalische Modell des Zwenkauer Sees wurde in 25 Segmente unterteilt. Die Lage und Abgrenzung der Segmente wurde aus der Seemorphometrie abgeleitet und dabei so vorgenommen, dass die Tiefen- und Flachwasserbereiche adäquat abgebildet werden.

Die einzelnen Segmente sind vertikal aus Schichten zusammengesetzt, die den Modellzellen entsprechen. Die Modellzellen sind abweichend zur tatsächlichen Geometrie symmetrisch angeordnet. Die größte vertikale Diskretisierung des Modells in den Tiefenwasserbereichen des Sees beträgt 0,5 m. Der Bereich oberhalb von +109 m NHN ist aufgrund

der Lage der Einleitstelle der Wärmepumpe in einer feineren Diskretisierung von 0,2 m aufgelöst.

Der Berechnungszeitschritt ist in CE-QUAL-W2 variabel und wird modellintern unter Berücksichtigung der numerischen Stabilität des Modells bestimmt. Die Stabilität wird maßgeblich von der höchsten windgetriebenen Strömungsgeschwindigkeit in der obersten Modellschicht bestimmt. In Abhängigkeit von der räumlichen Auflösung liegt der Berechnungszeitschritt zwischen minimal 0,1 und maximal 15 s der Realzeit. Die Berechnungsdauer für einen zehnjährigen Modelllauf beträgt etwa 20 h.

5.2.7 Modellanpassung

Zur Berechnung von Prognosevarianten musste das limnophysikalische Modell des Zwenkauer Sees möglichst gut an den Ausgangszustand angepasst werden. Die Kalibrierung des limnophysikalischen Modells für den See erfolgte anhand von Messreihen der hydrologischen Jahre 2015 bis 2021. Die Ergebnisse der Modellanpassung des limnophysikalischen Modells ist in Tabelle 14 zusammengefasst und in Abbildung 51 exemplarisch für das Jahr 2020 aufgeführt.

Die erste Zielgröße für die Modellanpassung ist der gemessene Wasserstand im See, wobei im konkreten Fall die Gewässerverdunstung als Kalibriergröße diente. Die Gewässerverdunstung wird maßgeblich vom Energieeintrag durch Wind und Strahlung beeinflusst. Zur Anpassung des Windeinflusses diente der Koeffizient für die Angreifbarkeit des Windes auf die Wasseroberfläche. Der Strahlungseinfluss wurde über den Extinktionskoeffizienten und den Anteil der absorbierten Strahlung an der Wasseroberfläche über die gemessene Sichttiefe angepasst. Die mittlere absolute Abweichung zwischen den gemessenen und den berechneten Wasserständen im Ergebnis der Modellanpassung ist mit 5 cm als sehr gering (Tabelle 14) und die Modellgüte entsprechend als sehr gut zu bewerten.

Auf Grundlage der kalibrierten Wasserbilanz wurde im nächsten Schritt die Wassertemperatur an die gemessenen Temperaturtiefenprofile des Zwenkauer Sees angepasst. Die Wassertemperatur wurde hauptsächlich durch die Verdunstungsparameter, den Strahlungseinfluss und die Parameter der Eisbedeckung angepasst. Die größten Abweichungen treten während der Sommerstagnation im Hypolimnion auf. In diesem Bereich unterschätzt das Modell die Wassertemperaturen.

Zur Bewertung der Anpassungsgüte des Modells wird die mittlere absolute Abweichung zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturprofilen verwendet. Diese liegt im Anpassungszeitraum von 2015 bis 2021 bei rund $\pm 1,1$ °C (Tabelle 14). Das kalibrierte Modell ist damit gemäß vergleichbaren Modellen von (Cole und Wells 2021) für die weitere Modellanwendung geeignet.

Zur weiteren Verifizierung der Modellanpassung wurden neben den Temperaturtiefenprofilen auch die modellierten Tiefenprofile der Sauerstoffkonzentration und der Sulfatkonzentration mit den entsprechend gemessenen Tiefenprofilen verglichen. Die mittlere absolute Abweichung zwischen der gemessenen und der modellierten Sauerstoffkonzentration beträgt $\pm 1,1$ mg/l und ist für die weiteren Prognosen akzeptabel. Die mittlere absolute Abweichung zwischen den gemessenen und berechneten Tiefenmessungen der Sulfatkonzentration beträgt ± 70 mg/l (Tabelle 14). Das entspricht beim Zwenkauer See



einer Abweichung von 7 % von der mittleren Sulfatkonzentration und ist somit akzeptabel.

Tabelle 14: Abweichung der Modellanpassung von den verwendeten Messwerten für den Zwenkauer See sowie verwendete Messstellen und Anzahl der Messungen

| | Ein- heit | Zwenkauer See |
|---|----------------------|---|
| Wasserstand | cm | ±5,2 |
| Temperatur | °C | ±1,1 |
| Sauerstoff | mg/l | ±1,1 |
| Sulfat | mg/l | ±70 |
| Messstelle | --- | RZS2/RZS2-2/RZS2-3/RZS2-4/RZS2-5/RZS2-7 |
| Anzahl Wasserstandsmessungen | Stck. | 86 |
| Anzahl Tiefenprofile Temperatur und Sauerstoff | Stck. | 502 |
| Anzahl Sulfatmessungen | Stck. | 239 |

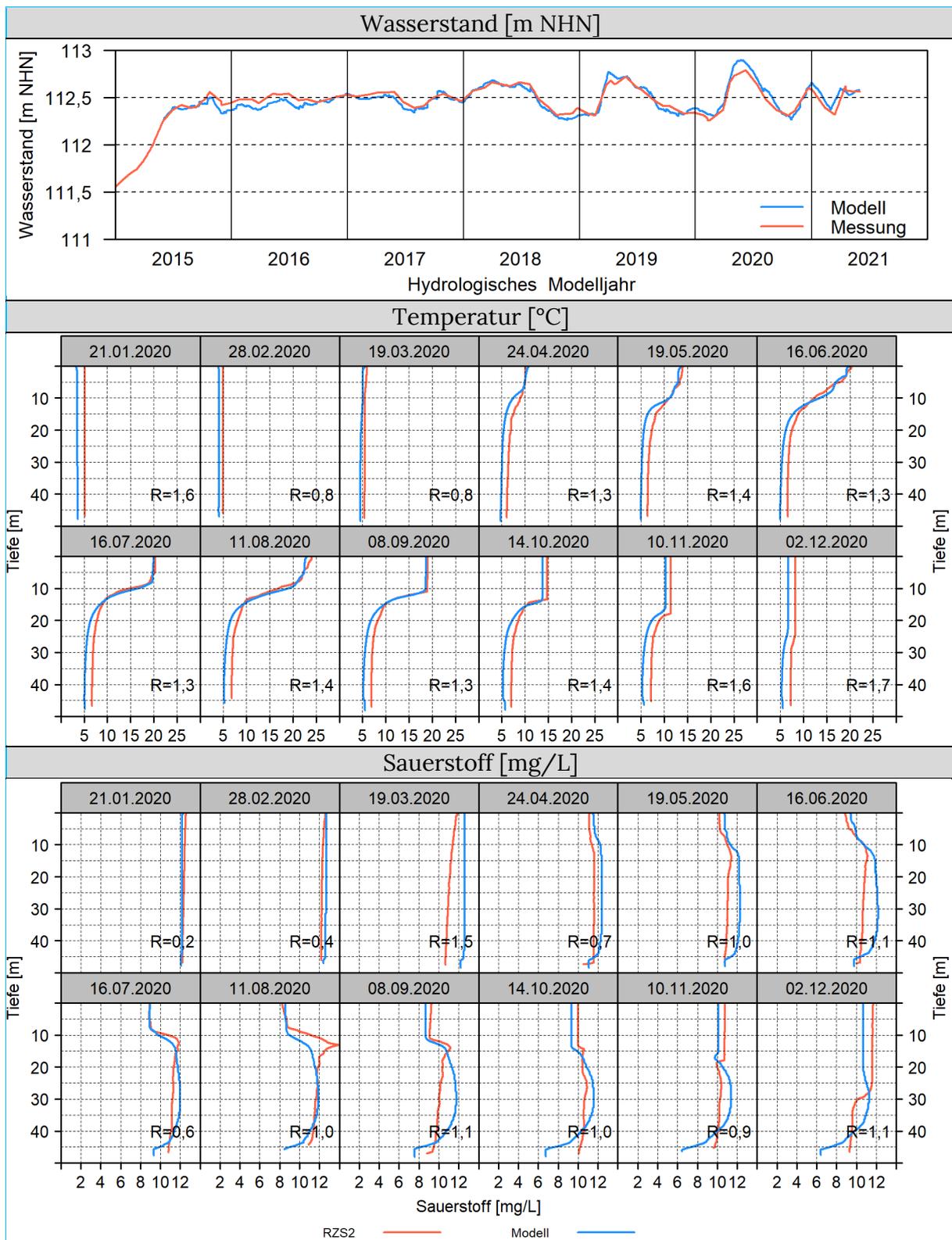


Abbildung 51: Vergleich der gemessenen Wasserstände und Tiefenprofile (rot) für Temperatur und Sauerstoff an der Messstelle RZS2 mit der Modellanpassung (blau) für den Zwenkauer See

5.3 Prognose zu den Auswirkungen des Wärmepumpenbetriebs im Zwenkauer See

5.3.1 Einfluss der Temperatur auf Struktur und Funktion von Gewässerökosystemen und abzuleitende Vorgaben für die thermische Gewässernutzung

Die Gewässertemperatur ist ein die biozönotischen Strukturen von Seen maßgeblich mitbestimmender Faktor (vgl. Abschnitt 2.3). Abweichungen vom natürlichen saisonalen Temperaturverlauf beeinflussen auf Ebene der einzelnen Organismen unmittelbar die physiologischen Prozesse und damit das Wachstum sowie die Fortpflanzung sowohl von Fischen als auch von Makrozoobenthos, Algen und anderen Gruppen. Hinzu kommt der steuernde Einfluss der Temperatur auf die Intensität des mikrobiellen Stoffumsatzes und damit auf die Stoffkreisläufe in Gewässern. Eine Verminderung der Wassertemperatur wird sich unter allen biologischen Prozessen am ehesten in einer Abnahme der mikrobiologischen Aktivität und/oder in einer Veränderung der Struktur der mikrobiellen Zönose nachweisen lassen.

In mitteleuropäischen Gewässern ist eine Adaptation der Gewässerökosysteme an wechselnde Witterungs- und damit Temperaturbedingungen aufgrund der natürlichen von Jahr zu Jahr zu verzeichnenden unterschiedlichen Wetterabläufe gegeben, ohne dass dies die Ökosystemfunktionen beeinträchtigen wird. Unterschiedliche jährliche Temperaturverläufe führen auf der Ebene der Lebensgemeinschaften jedoch zu unterschiedlichen Strukturen. Dies kommt am deutlichsten in den Anteilen der einzelnen Arten an der Gesamtabundanz zum Ausdruck.

Vor dem Hintergrund der natürlichen Temperaturvarianz sind Veränderungen von 1 K außerhalb einer gewässerspezifisch zu definierenden Durchmischungszone gegenüber dem unbeeinflussten Zustand als ökologisch nicht relevant anzusehen, sofern bei anthropogen bedingten Temperaturerhöhungen eine ökophysiologisch kritische Maximaltemperatur nicht überschritten wird. Dies wurde in der Oberflächengewässerverordnung (OGewV (BMU 2016)) berücksichtigt, die für den guten ökologischen Zustand bzw. das gute ökologische Potenzial für Fließgewässer eine tolerierbare Temperaturerhöhung je nach Fließgewässertyp und Jahreszeit zwischen ≤ 1 und ≤ 3 K vorsieht. Für Seen gibt es in der (OGewV (BMU 2016)) keine explizite Festlegung. Verminderungen der Temperatur werden nicht berücksichtigt. Hinsichtlich Auswirkungen auf das Gewässerökosystem ist zwischen Temperaturerhöhung und -verminderung jedoch keine Differenzierung möglich.

Regelungen für die thermische Nutzung von Seewasser wurden in Deutschland für den Bodensee getroffen (IGKB 2014). Diese erlauben einen Wärmepumpenbetrieb, wenn sichergestellt ist, dass weder im See als Ganzes noch lokal der See selbst noch seine Lebensgemeinschaften beeinträchtigt werden. Hierzu werden jedoch keine konkreten Festlegungen getroffen. Die maximale Änderung der Temperatur im Bereich der Rückleitstelle muss außerhalb einer definierten Mischungszone unter 1 K bleiben.

Entnahme- und Rückleitungspunkte des Wassers sowie deren Tiefen und auch die Temperaturdifferenz zwischen Entnahme- und Rückleitungswasser können je nach Gewässer und Anlage sehr unterschiedlich sein und sind im Einzelfall ggf. durch entsprechende

limnophysikalische Modellierungen zu prüfen, sodass jeweils die ökologisch verträglichste technische Umsetzung gefunden werden kann.

5.3.2 Varianten

Für die Untersuchung des Einflusses des Wärmepumpenbetriebs auf den Zwenkauer See werden zwei Varianten betrachtet. Die Referenzvariante sieht den stationären Ausgangszustand vor, ohne Wärmepumpenbetrieb. In Variante 1 wird dagegen ein ganzjähriger Wärmepumpenbetrieb vorgesehen. Die Entnahme- und Einleitstellen der Wärmepumpe befinden sich am Nordufer in der Nähe des geplanten Walddorfes auf einer Höhe von +110 m NHN und immer mindestens 3 m unter dem Wasserspiegel. In Variante 1 erfolgt eine Wasserentnahme entsprechend des prognostizierten Wärmebedarfs des Quartiers aus Abschnitt 3.4. Die Entnahme- und Einleitmengen der Wärmepumpe berechnen sich aus diesem Wärmebedarf und der theoretischen Temperaturdifferenz von 3 K. Damit ergibt sich eine maximale Entnahme- und Einleitmenge von knapp 120 m³/h.

In den beiden Prognosevarianten ist die Flutung des Zwenkauer Sees abgeschlossen und der Zwenkauer See auf einen Wasserstand von +113,5 m NHN eingestellt. Den Prognosevarianten wurde die meteorologische Modellzeitreihe von 2011 bis 2021 (vgl. Abschnitt 5.2.4) aufgeprägt.

Zur Veranschaulichung der limnophysikalischen Entwicklung des Zwenkauer Sees ist die räumliche Entwicklung der Temperatur und der Sauerstoffsättigung in repräsentativen Modellsegmenten über das Tiefenprofil als Konturgrafiken dargestellt (Abbildung 52). Die Notwendigkeit zur Betrachtung auch der Sauerstoffkonzentrationen ergibt sich aus der vollständigen Entgasung des Wassers beim Einsatz der Vakuum-Flüssigeis-Technologie, wodurch das in den See nach Wärmeentzug zurückgeleitete Wasser sauerstofffrei ist.

Die Graduierung des physikalischen oder chemischen Kennwertes erfolgt entsprechend der Farbskala in der Legende.

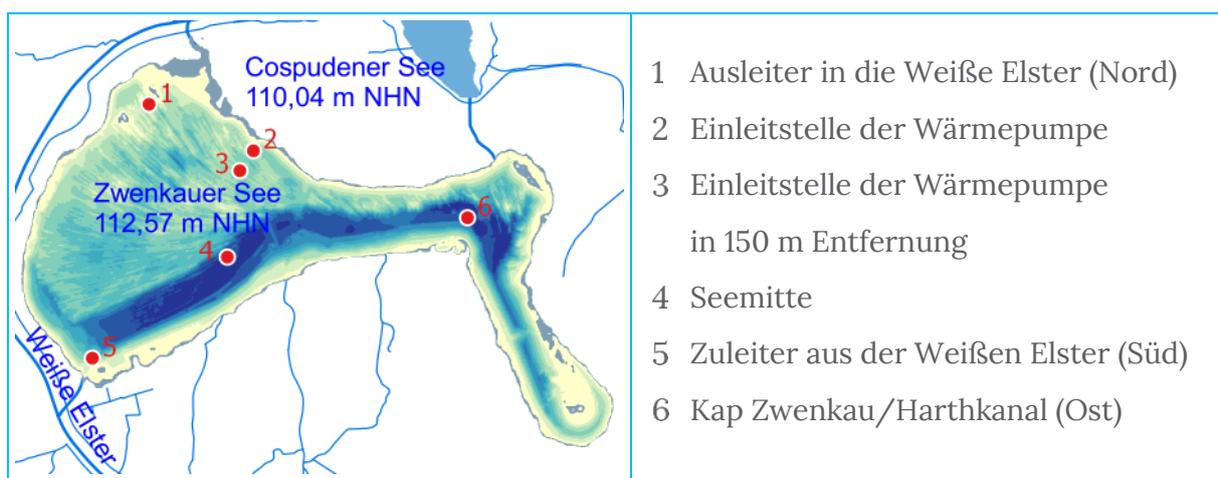


Abbildung 52: Lage der repräsentativen Stellen des Zwenkauer Sees für die Konturgrafiken des limnophysikalischen Modells (eigene Darstellung IWB unter Nutzung zur Verfügung gestellter Daten)

5.3.3 Referenzvariante ohne Wärmepumpenbetrieb

Die Referenzvariante ohne Wärmepumpenbetrieb dient als Vergleichsvariante, anhand derer der Einfluss des Wärmepumpenbetriebs auf die Temperaturschichtung und die Sauerstoffverhältnisse bewertet wird.

5.3.3.1 Temperatur

Die limnophysikalische Modellierung zeigt den Zwenkauer See in der Referenzvariante innerhalb der 10-jährigen meteorologischen Modellreihe als dimiktisches Gewässer mit jährlicher sommerlicher Stagnationsperiode und einer Frühjahrs- und einer Herbstvollzirkulation. Hinzu kommt in den Jahren mit winterlicher Eisbedeckung eine Winterstagnationsperiode mit inverser Temperaturschichtung, die in Jahren mit fehlender Eisbedeckung, wie in den Wintern 2015/16 und 2019/20, ganz oder weitgehend ausbleiben kann (Abbildung 54).

Der typische Jahresgang der Temperaturschichtung im Zwenkauer See ist in Abbildung 53 für das hydrologische Jahr 2013 beispielhaft detaillierter dargestellt. Nach der Herbstvollzirkulation im November/Dezember bildet sich zwischen Januar und März unter Eis die Winterstagnation aus. Diese ist zunächst durch eine Abkühlung der Wassertemperaturen auf ca. 4 °C geprägt. Aufgrund der niedrigen Lufttemperaturen kühlt sich das Wasser an der Seeoberfläche oder bei stärkerer windinduzierter Durchmischung auch bis in tiefere Bereiche weiter bis auf ca. 0 °C ab, während im Tiefenwasser eine stabile Temperatur um 4 °C (Dichtemaximum) bestehen bleibt. Vorübergehende Eisbedeckungen stabilisieren die winterliche Temperaturschichtung. Nach dem Eisauflbruch etwa im März (sofern vorhanden) löst die Frühjahrszirkulation die Winterstagnation auf und durchmischt den See bis etwa Mitte April vollständig (Frühjahrsvollzirkulation). Anschließend erwärmt sich das Oberflächenwasser und bildet ein typisches Sommerstagnationsprofil, bestehend aus einem erwärmten Oberflächenwasser (Epilimnion), einer Sprungschicht (Metalimnion) mit einem hohen Temperaturgradienten über die Tiefe und einem weiterhin kühlen Tiefenwasser (Hypolimnion). Die maximalen Wassertemperaturen an der Seeoberfläche stellen sich etwa Juli/August bei 20 bis 25 °C ein, während im Hypolimnion die Temperaturen, die der Wasserkörper während der Frühjahrsvollzirkulation vor dem Einsetzen der Sommerstagnation hatte, nur geringfügig ansteigen.

Beginnend ab etwa Mitte August kühlt sich die Oberflächentemperatur des Sees wegen der stärkeren Nachtabkühlung der Lufttemperatur und der abnehmenden Sonneneinstrahlung wieder ab. Trotz fortwährender Abkühlung bleibt die Temperaturschichtung zunächst noch stabil. Erst im Oktober erreicht das Epilimnion mit rund 15 m seine maximale Tiefenausdehnung bzw. Mächtigkeit. Mit fortwährender Abkühlung und Verringerung des Temperatur- und Dichtegradienten über die Tiefe sowie mit dem Auftreten stärkerer Windereignisse wird der See schließlich im November von der Herbstzirkulation erfasst und wieder vollständig durchmischt.

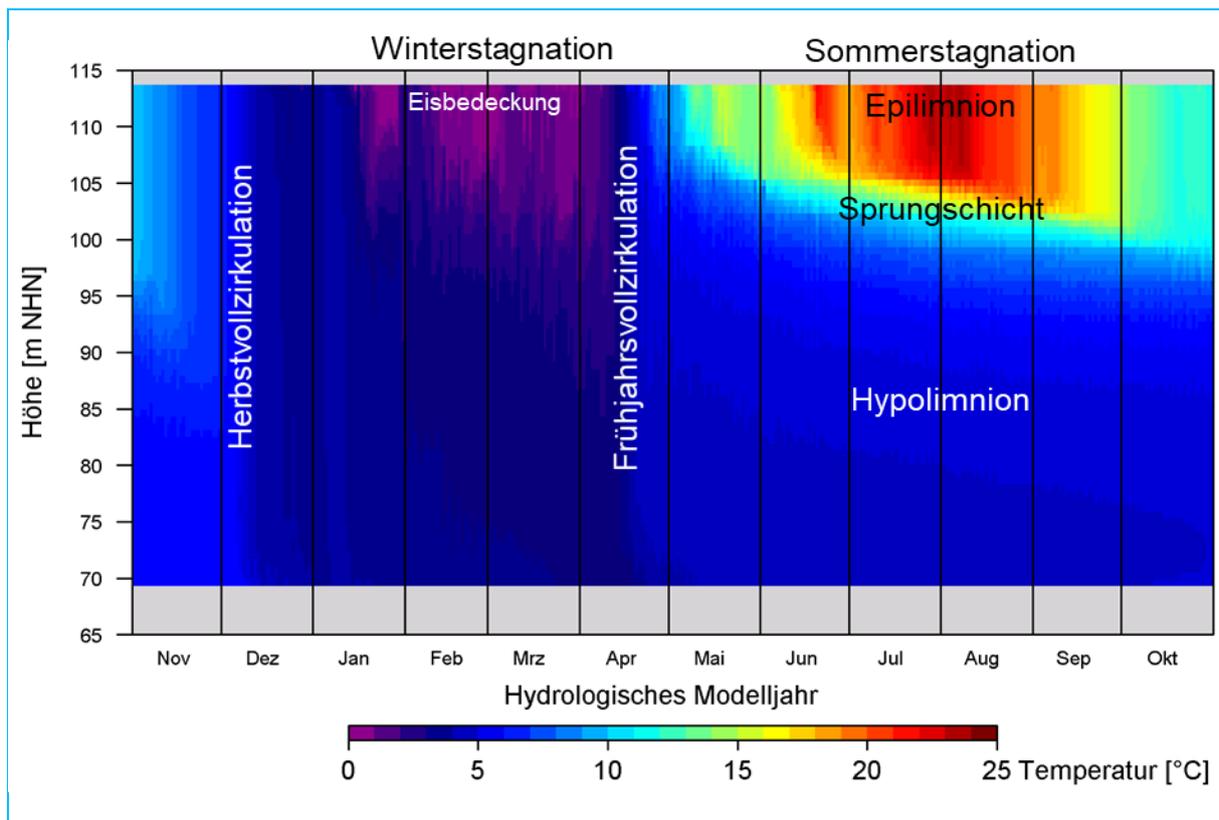


Abbildung 53: Konturdiagramm der berechneten Entwicklung der Wassertemperatur im Zwenkauer See unter dem Witterungseinfluss des hydrologischen Jahres 2013, Seemitte (Segment 14), Referenzvariante ohne Wärmepumpenbetrieb

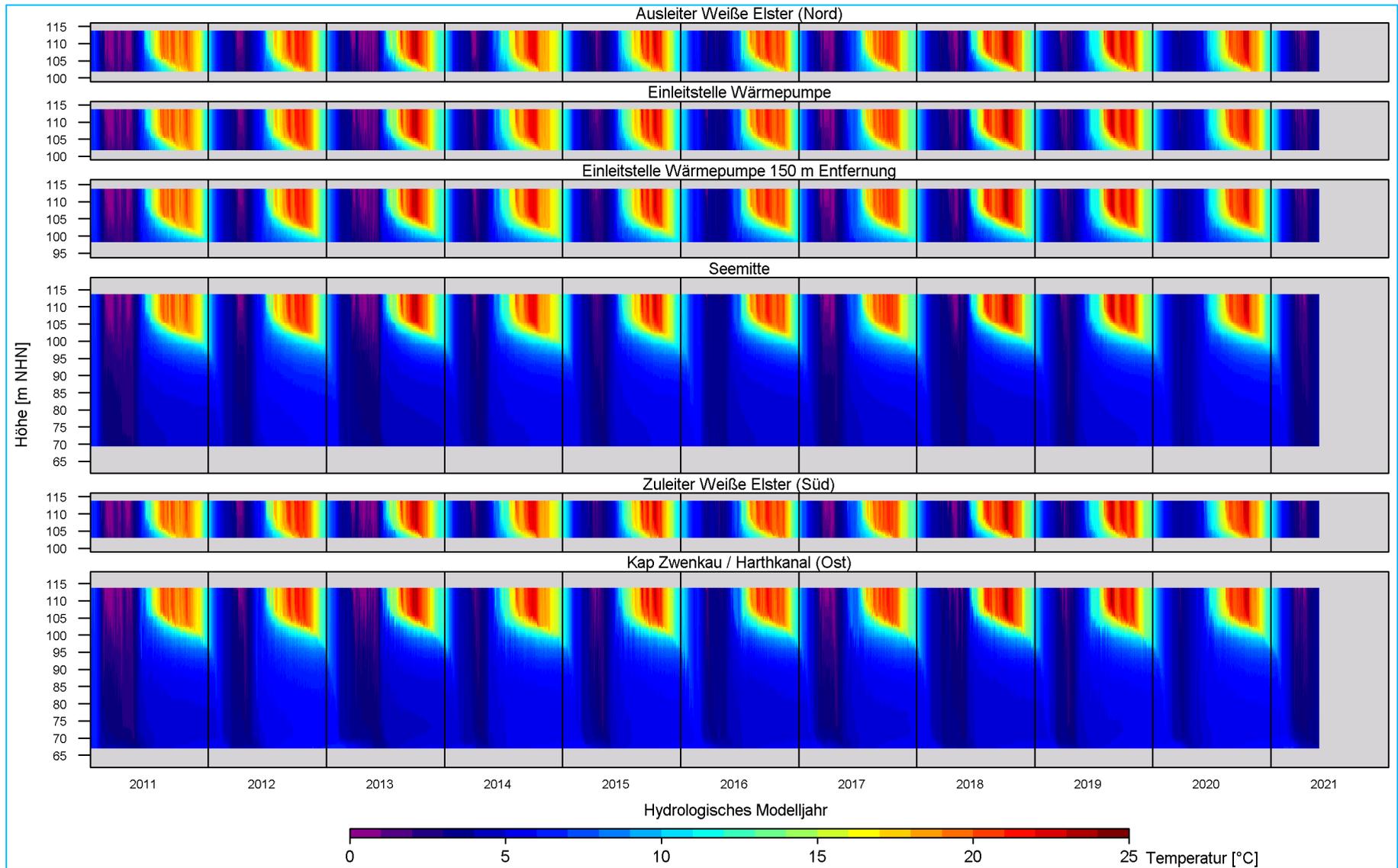


Abbildung 54: Räumliche Entwicklung der Temperaturschichtung des Zwenkauer Sees für die hydrologischen Modelljahre 2011 bis 2021

5.3.3.2 Sauerstoff

Der Zwenkauer See weist ganzjährige fast im gesamten Seewasserkörper Sauerstoffkonzentrationen im Sättigungsbereich ($> 90\%$) auf (Abbildung 55). Während der Sommertagnation können im Metalimnion aufgrund von Einschichtungen von Algen und durch ihre Photosyntheseaktivität zeitweise leichte Übersättigungen auftreten. In den grundnahen Tiefenwasserbereichen des Randschlauchs kann die Sauerstoffsättigung während der Schichtungsperioden und damit verringertem Wasseraustausch mit dem restlichen Seewasserkörper auf im Minimum ca. 40% abnehmen. Die sauerstoffarmen Verhältnisse im Tiefenwasser werden durch den dichteabhängigen Zutritt von sauerstofffreiem und stärker mineralisiertem Grundwasser in das Tiefenwasser sowie durch die Sauerstoffzehrung des Sediments aufgrund mikrobiologischer Abbauprozesse von organischem Material sowie durch chemische Oxidationsprozesse (Eisen) verursacht. Mit den vom Modell berechneten Werten ist aber selbst dort noch eine relativ gute Sauerstoffverfügbarkeit für Organismen gegeben.

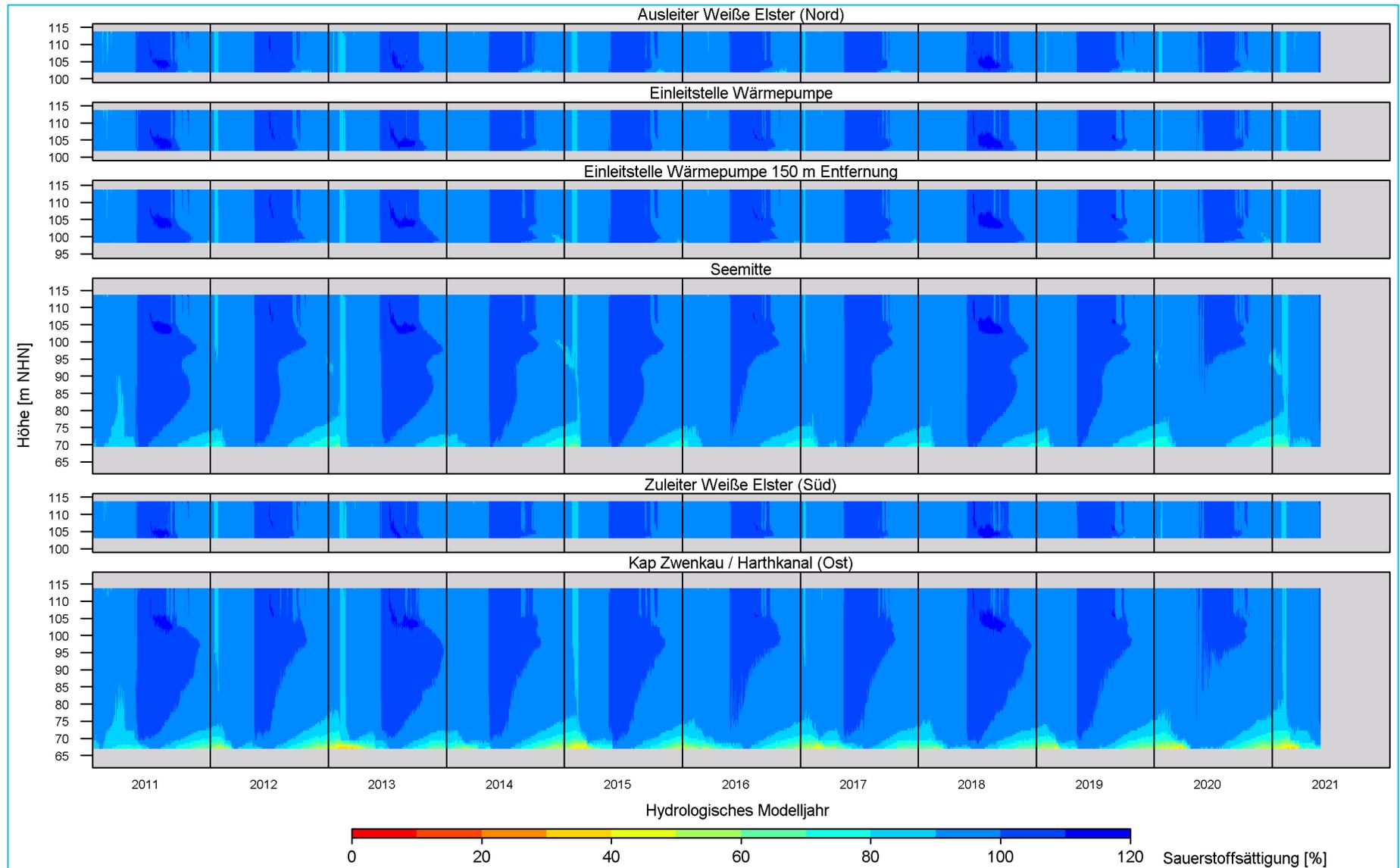


Abbildung 55: Räumliche Entwicklung der Sauerstoffsättigung des Zwenkauer Sees für die hydrologischen Modelljahre 2011 bis 2021

5.3.4 Limnologische Einflüsse durch Wärmepumpenbetrieb

5.3.4.1 Temperatur

Der Einfluss des Wärmepumpenbetriebs auf die Temperatur- und Sauerstoffverhältnisse im See wird ebenfalls mittels Konturgrafiken dargestellt. Damit auch geringe Abweichungen sichtbar werden, werden nicht die Absolutwerte, sondern die Differenzen der Wassertemperatur und des Sauerstoffgehalts zur Referenzvariante abgebildet. Zusätzlich sind in der Abbildung die Eisbedeckung und die Entnahmemenge für den Wärmepumpenbetrieb zu entnehmen. Die Differenzen der Temperaturschichtung und des Sauerstoffgehalts zwischen der Betriebs- und der Referenzvariante zeigen Abbildung 56 bzw. Abbildung 57. Dargestellt sind die Differenzen für die Einleitstelle, in 150 m Entfernung davon und für die Seemitte. Das entspricht den Punkten 2, 3 und 4 in Abbildung 52.

Durch den Wärmepumpenbetrieb in der geplanten Dimensionierung lässt sich für den Zwenkauer See auf Basis der zugrunde gelegten zehnjährigen meteorologischen Modellreihe keine ökologisch relevante Veränderung des Temperaturhaushalts des Gewässers aus den limnophysikalischen Modellrechnungen unter Wärmepumpenbetrieb ableiten (Abbildung 56). Die im See zu erwartenden Temperaturveränderungen erreichen an allen der ausgewählten Stellen zu keinem Zeitpunkt 1 K. In über 95 % des betrachteten zehnjährigen Modellzeitraums liegt die Differenz zwischen Referenzvariante und Variante mit Wärmepumpenbetrieb bei weniger als 0,25 K.

Den größten Einfluss auf die Wassertemperaturen hat der Wärmepumpenbetrieb während Zeiten des Auftretens einer Winterstagnation mit Temperaturen des Sees von 4 °C und darunter, d.h. bei Ausbildung einer Eisbedeckung. Durch die fehlende windinduzierte Durchmischung verlangsamt sich der Wärmeaustausch mit dem umgebenden Wasserkörper. Das abgekühlte und leichtere Wasser steigt unter der Eisdecke nach oben und kühlt dabei den Bereich zwischen der Eisdecke und der Einleitstelle ab. An der Einleitstelle und in der darüber liegenden Wassersäule beträgt die maximale Abkühlung 0,6 K und ist im restlichen Modellzeitraum um ein Vielfaches geringer. Während der Eisbedeckung wird durch die Einleitung von 0 °C kaltem Wasser das wärmere Wasser aufgrund der Dichteunterschiede nach unten verdrängt. Daher ist unter der Einleitstelle eine scheinbare Erwärmung zu erkennen.

Eine derartige Beeinflussung der Temperaturverteilung ist in der zehnjährigen Modellreihe nur dreimal aufgetreten: während der Winterstagnation in den hydrologischen Jahren 2010, 2017 und 2021. Der Einfluss ist auf die Wassersäule über der Einleitstelle begrenzt. Der Einfluss des Wärmepumpenbetriebs kann während dieser Phasen auch die Seemitte in etwa 1 km Entfernung erreichen.

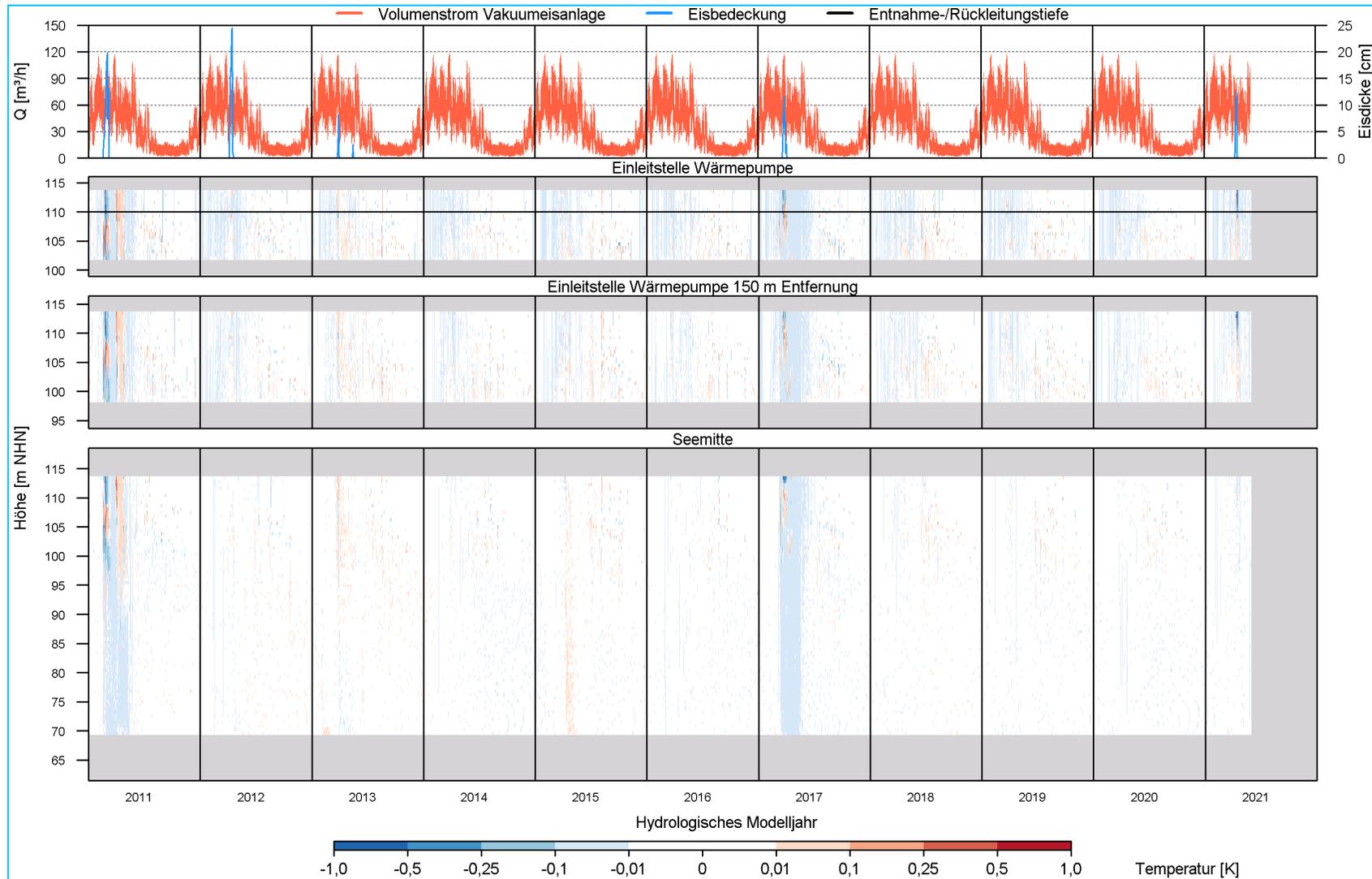


Abbildung 56: Räumliche Entwicklung der Differenzen der Temperaturschichtung zwischen der Referenzvariante und der Variante mit Wärmepumpenbetrieb im Zwenkauer See für die hydrologischen Modelljahre 2011 bis 2021

5.3.4.2 Sauerstoff

Die technisch bedingte komplette Entgasung des für die Wärmeengewinnung genutzten Seewassers bei der Vakuum-Flüssigeis-/Direktverdampfungs-Technologie bedingt die Rückleitung sauerstofffreien Wassers in den Zwenkauer See. Dies führt gemäß den Modellierungsergebnissen zu einer Abnahme der Sauerstoffkonzentration im Bereich der Einleitstelle von maximal 0,6 mg/l (Abbildung 57).

Der größte Einfluss auf die Sauerstoffkonzentrationen ergibt sich wie bei den Temperaturen zu Zeiten der Winterstagnation bei Eisbedeckung. Da das Seewasser zu diesen Zeitpunkten eine Temperatur von 4 °C und darunter aufweist, liegen die Referenzsauerstoffkonzentrationen bei rund 13 mg/l. Zu anderen Zeiten des Jahres fällt der Rückgang der Sauerstoffkonzentrationen mit Begrenzung auf einen größeren Bereich um die Einleitung herum aufgrund einer rascheren Mischung mit dem umgebenden Seewasser geringer aus.

Die Verminderung im Bereich um die Einleitung um einige Zehntel Milligramm hat aufgrund der sich stets im Sättigungsbereich bewegenden Sauerstoffkonzentrationen des die Einleitung umgebenden Seewassers zu keiner Zeit des Jahres nachteilige ökologische Auswirkungen. Es ist auch unter Wärmepumpenbetrieb stets von einer unverändert sehr guten Sauerstoffversorgung der Organismen im See auszugehen. Als Vorteil für den Sauerstoffhaushalt ist die Einleitung des sauerstofffreien Wassers in das gut durchmischte Epilimnion während der Sommerstagnation zu sehen. Bei einer Einleitung in den hypolimnischen Tiefenwasserkörper, der während der Dauer der Schichtung keine Verbindung zur Atmosphäre hat und dessen Stoffhaushalt von Zehrungsprozessen dominiert wird, wäre eine deutlich stärkere Beeinflussung durch den Wärmepumpenbetrieb in den Sommermonaten zu verzeichnen.

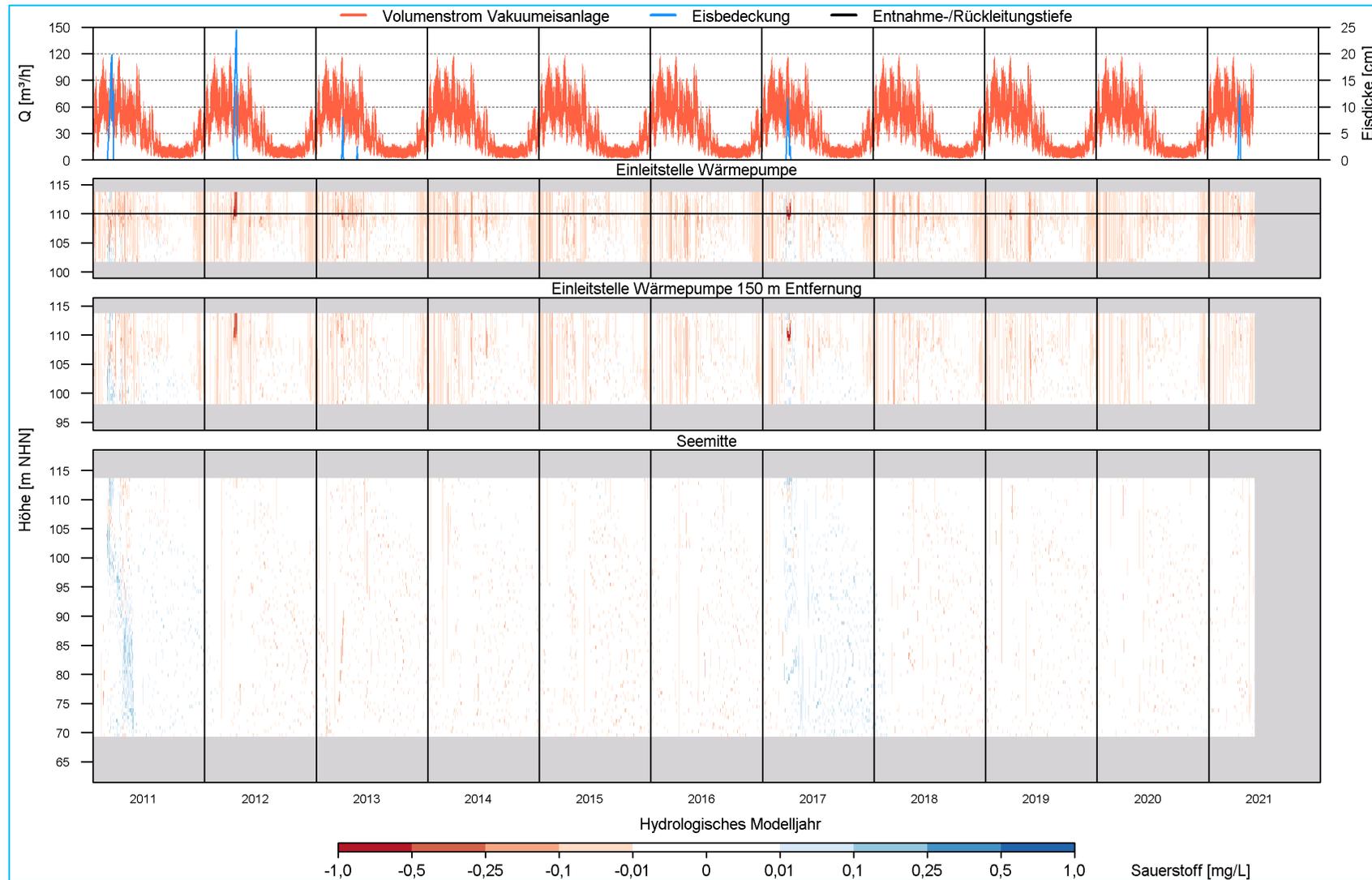


Abbildung 57: Räumliche Entwicklung der Differenzen des Sauerstoffgehalts zwischen der Referenzvariante und der Variante mit Wärmepumpenbetrieb im Zwenkauer See für die hydrologischen Modelljahre 2011 bis 2021

5.3.5 Auswirkungen auf die Eisbedeckung

Der Wärmepumpenbetrieb hat nur sehr geringe Auswirkungen auf Dauer und Dicke der Eisbedeckung des Zwenkauer Sees (Tabelle 15). Nur im hydrologischen Jahr 2012 nimmt die Dauer der Eisbedeckung um einen halben Tag bezogen auf den gesamten Zwenkauer See zu. Die mittlere Eisdicke erhöht sich nur im Bereich von weniger als 1 mm. Bei der maximalen Eisdicke lassen sich keine Veränderungen nachweisen.

Ein Einfluss des Wärmepumpenbetriebs auf die Eisdicke ist damit allenfalls streng lokal begrenzt auf den Bereich der Einleitstelle möglich, an der ein Aufstieg von Flüssigeis bzw. von im Vergleich zum umgebenden Wasser kälterem Wasser zur Oberfläche hin erfolgt, was die Eisbildung an der Oberfläche fördern kann. Dies konnte modellseitig jedoch nicht nachgewiesen werden.

Tabelle 15: Dauer der Eisbedeckung sowie mittlere und maximale Eisdicke für alle Modellbereiche des Zwenkauer Sees während des Modellzeitraums für die Referenzvariante (Var 0) und die Variante mit Wärmepumpenbetrieb (Var 1)

| Jahr | Anzahl [Tage] | | Mittlere Eisdicke [cm] | | Maximale Eisdicke [cm] | |
|------|------------------|-------|---------------------------|-------|---------------------------|-------|
| | Var 0 | Var 1 | Var 0 | Var 1 | Var 0 | Var 1 |
| 2011 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 0,00 | 0,0 | 0,0 |
| 2012 | 14,2 | 14,8 | 4,90 | 4,93 | 21,0 | 21,0 |
| 2013 | 12,7 | 12,7 | 4,13 | 4,13 | 33,2 | 33,2 |
| 2014 | 5,2 | 5,2 | 2,97 | 2,99 | 18,2 | 18,2 |
| 2015 | 0,2 | 0,2 | 1,92 | 1,92 | 5,4 | 5,4 |
| 2016 | 0,0 | 0,0 | 0,55 | 0,55 | 2,2 | 2,2 |
| 2017 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 0,00 | 0,0 | 0,0 |
| 2018 | 9,0 | 9,0 | 4,19 | 4,23 | 12,7 | 12,7 |
| 2019 | 3,2 | 3,2 | 1,70 | 1,70 | 16,8 | 16,8 |
| 2020 | 1,9 | 1,9 | 1,41 | 1,41 | 11,0 | 11,0 |
| 2021 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 0,00 | 0,0 | 0,0 |

5.3.6 Prognostizierter Wärmepumpenbetrieb

Die Entnahmetemperaturen bestimmen die Betriebsweise der Vakuum-Flüssigeis-Anlage und damit, welche Entnahmemengen für den Betrieb erforderlich sind. In Abbildung 58 ist die Summenhäufigkeit der Wassertemperaturen an der Entnahmestelle und der resultierenden Entnahmemenge dargestellt. Im Schnitt werden 30 m³/h mit einer mittleren Temperatur von knapp über 10 °C entnommen. Ein vereisender Betrieb bei unter 4 °C Wassertemperatur findet nur während eines Viertels des Modellzeitraums statt. Die maximale Entnahmemenge beträgt ca. 120 m³/h. Während 90 % des Modellzeitraums ist die Entnahmemenge kleiner als 80 m³/h.

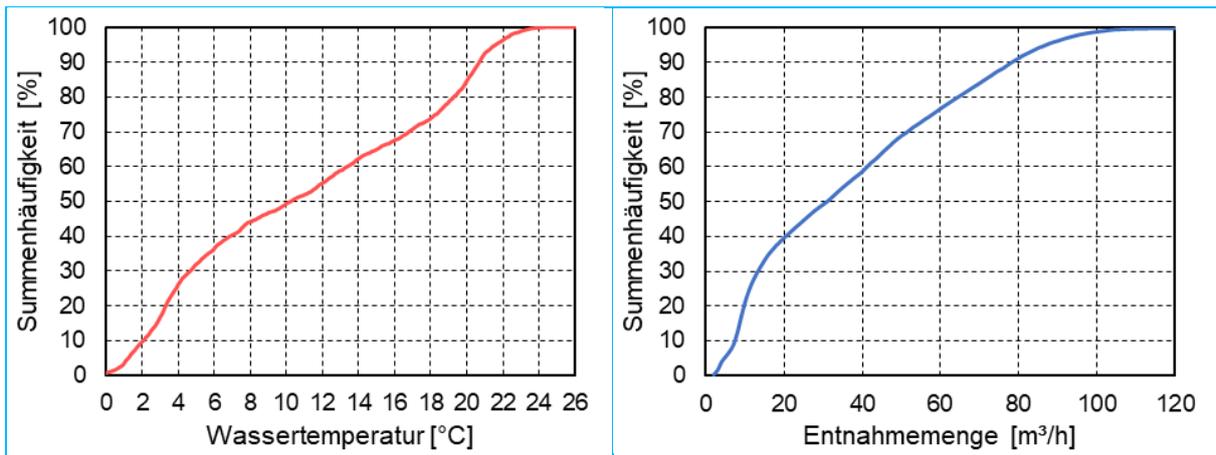


Abbildung 58: Summenhäufigkeit der Wassertemperaturen an der Entnahmestelle (links) und der resultierenden Entnahmemengen (rechts) für die Vakuum-Flüssigeis-Anlage

5.3.7 Ergebnisse

Durch limnophysikalische Modellierungen konnte für verschiedene Bereiche in unterschiedlicher Entfernung von der Rückleitstelle des zur Wärmegewinnung entnommenen Wassers nachgewiesen werden, dass es durch einen Wärmepumpenbetrieb in der vorgesehenen Dimensionierung im Zwenkauer See zu keiner Zeit zu einer Temperaturveränderung von 1 K oder darüber kommt. In über 95 % des Jahresverlaufs liegen die maximalen lokalen Temperaturveränderungen unter 0,25 K. Die Verminderungen der Sauerstoffkonzentrationen erreichen im Einleitungsbereich temporär und lokal maximal 0,6 mg/l. Aufgrund der stets hohen Sauerstoffkonzentrationen im Bereich der Einleitstelle wird eine als kritisch anzusehende Sauerstoffkonzentration zu keiner Zeit annähernd erreicht.

Aus dem prognostizierten Wärmepumpenbetrieb lassen sich entsprechend keine nachteiligen Veränderungen auf die Gewässerökologie hinsichtlich des natürlichen Schichtungsverhaltens und des Sauerstoffhaushalts des Zwenkauer Sees ableiten. Die Veränderungen der Lebensbedingungen für die Organismen im See sind minimal und als ökologisch nicht relevant anzusehen.

6 Technisches Konzept und Wirtschaftlichkeit

6.1 Technisches Konzept

Es wurde ein technisches Konzept entwickelt, bei dem die Wärmeversorgung der Gebäude in Form eines Nahwärmenetzes erfolgt. Eine vorherige überschlägige Variantendiskussion im Autorenteam auf Basis technisch-wirtschaftlicher Kenngrößen führte zu einem praktikablen, genehmigungsfähigen sowie wirtschaftlichen System, mit dem die Belange der Genehmigung und der ökologischen Auswirkungen bewertet werden können.

Die Auswahlkriterien für das Gesamtsystem inkl. der Entnahme von Wasser aus dem Zwenkauer See waren je nach Teilsystem unterschiedlich.

Die Entnahme und Einleitung sollte ufernah erfolgen, um kurze Leitungslängen zu gewährleisten. Gleichzeitig sollte eine Mindestwassertiefe von 3 m unter dem Wasserspiegel und mindestens 3 m über der Sohle des Sees stattfinden. Die Einleitungsstelle sollte dort lokalisiert werden, wo der See in kurzer Entfernung zum Ufer relativ schnell die benötigte Tiefe erreicht. Ausgehend von diesen Erwägungen wurde die Einleitungsstelle nahe dem Seedorf festgelegt.

Weiterhin sollte nur eine zentrale Vakuum-Flüssigeis-Anlage (VFA) installiert werden, da die spezifischen Investitionskosten in diesem Fall am geringsten sind. Das Netz zur Wärmeverteilung sollte zum überwiegenden Anteil als Niedertemperaturnetz (Quellnetz) ausgeführt werden, um entstehende Wärmeverluste gering zu halten. Gleichzeitig wurden Skaleneffekte und Gleichzeitigkeitsfaktoren genutzt, die sich bei der Dimensionierung der Wärmepumpeneinheiten positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. Der Kühlbetrieb in Sommer wird konzeptionell nicht betrachtet, kann aber bei weiterer Planung ohne großen Aufwand integriert werden.

Als Ergebnis des Abwägungsprozesses wurde das Referenzsystem mit folgenden Komponenten, wie in Abbildung 59 dargestellt, festgelegt. Die Komponenten seien wie folgt beschrieben:

- ▶ Die zentrale Entnahme und Einleitung erfolgt an identischer Stelle am Bootsteg im Seedorf ca. 100 m vom Ufer entfernt. Die Rohre werden an der Unterseite des Stegs befestigt. Die Dimensionierung der Rohrleitungen erfolgt anhand der maximal zulässigen Geschwindigkeit am Ansaugpunkt von 0,5 m/s bei maximaler Entnahme von 8,6 l/s. Im Ergebnis wird eine Mindestweite DN 150 abgeleitet. An der Ansaugstelle sollte ein grober Schmutzfilter in Form einer Siebstruktur vorgeschaltet sein. Der damit verbundene Druckverlust muss über eine Aufweitung des Durchmessers kompensiert werden. Für den Ansaugstutzen wird eine Nennweite von DN 300 konzipiert.
- ▶ Da angesaugte Wasser wird der zentralen Vakuum-Flüssigeis-Anlage zugeführt. Diese wurde auf die Heizlast des nachgelagerten Primärnetz mit 493 kW_{th} ausgelegt. Wesentliche Energieverbraucher der Anlage sind zum ei-

nen die Vakuumpumpe, welche zur initialen Druckabsenkung in der Arbeitskammer der Anlage genutzt wird, die Förderpumpe, die nötigenfalls das Wasser zurück in den See fördert, und der Turboverdichter, der den Wasserdampf dem Kondensator zuführt. Zudem führt eine kleine Mediapumpe das Kondensat zurück in den Arbeitsraum. Von der Vakuum-Flüssigeis-Anlage erfolgt die Übergabe der Niedertemperatur-Wärme mittels Wärmeübertrager über den Kondensatkreislauf an das Niedertemperaturnetz (Primärnetz).

- ▶ Das Primärnetz ist als nicht isoliertes Netz mit Vorlauf und Rücklauf ausgeführt und wird auf einem Temperaturniveau zwischen 5 ° C und ca. 20 ° C mit Wasser als Medium betrieben. Das Netz wird ohne Isolierung mit Nennweite DN 125 als Kunststoffrohr ausgeführt. Wesentlicher Energieverbraucher im Primärnetz sind die Netzpumpen mit einer maximalen Leistung von 12 kW. Die Wärmeübergabe vom Primärnetz erfolgt an vier Übergabestationen für jedes räumliche Cluster über Wärmetauscher
- ▶ Die vier Übergabestationen (Hafendorf, Seedorf, Walddorf, Camping) speisen mit integrierten Wärmepumpen unterschiedlicher Leistung das jeweils nachgelagerte Mitteltemperatur-Wärmenetze (Sekundärnetz). Die Wärmepumpen stellen die in den Gebäuden benötigten Temperaturen von bis zu ca. 50 ° C bereit. Die Speicherung der Wärme kann in den Übergabestationen oder dezentral auf Ebene der Gebäude erfolgen. Dies muss im Rahmen der Detailplanung erarbeitet werden. Wesentliche Energieverbraucher sind die Wärmepumpen selbst wie auch die Netzpumpen der Sekundärnetze.
- ▶ Die vier Sekundärnetze verteilen die Wärme von den Übergabestationen zu den Hausanschlüssen. Die Netze werden als klassisches Nahwärmesystem mit isolierten Wärmeleitungen ausgeführt.
- ▶ Die 153 Hausanschlussstationen übertragen die Wärme vom Sekundärnetz an die Wärmeübertrager im Gebäude und besitzen eine eingebaute Trinkwasserstation sowie ggf. eine elektrische Heizungsunterstützung und einen Warmwasserspeicher.

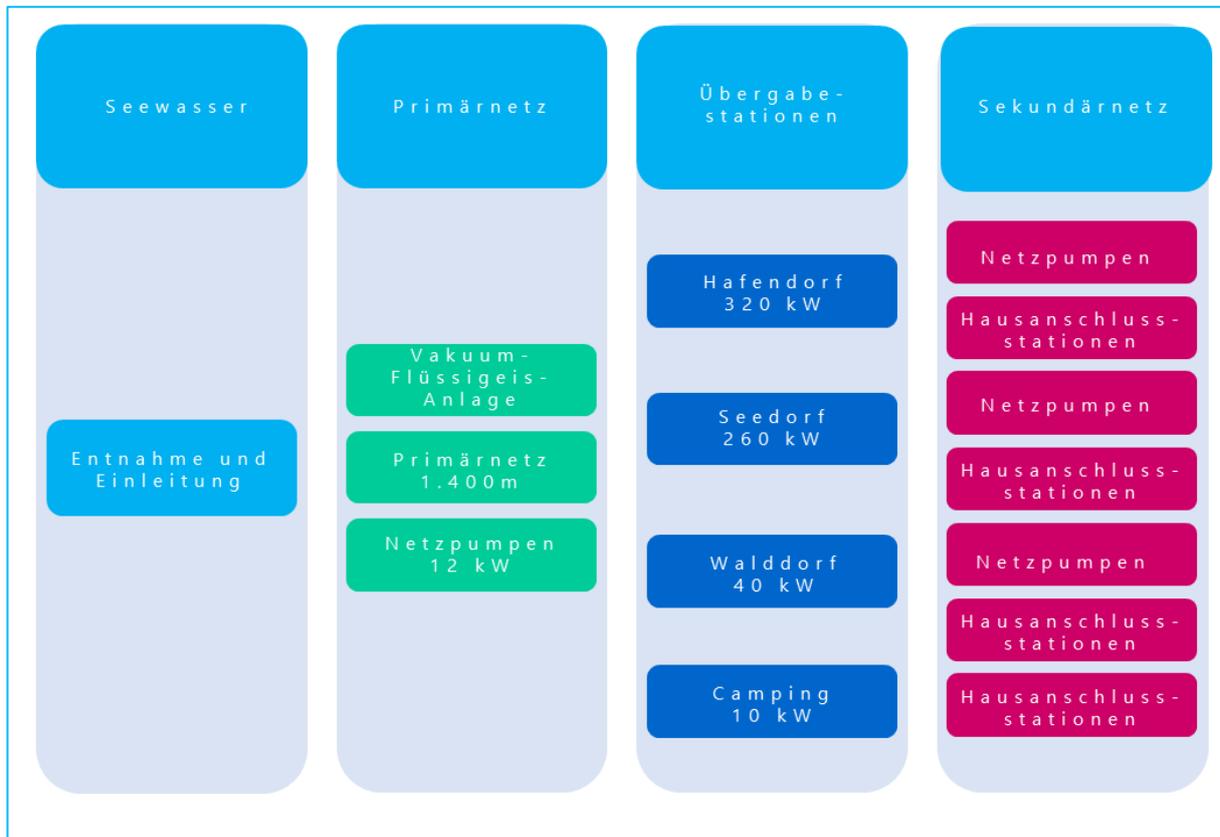
Die weiteren Daten zur Dimensionierung der Netzinfrastruktur-Komponenten sind der Tabelle 16 zu entnehmen. Abbildung 59 gibt einen Überblick über die Komponenten-Hierarchie.

Tabelle 16: Grobe Auslegung der Netzinfrastruktur.

| Cluster | Anschlussleistung $P_{\text{Wärmepumpe}}$ [kW] | Netzlänge [m] | DN | Leistung Netzpumpen [kW] |
|------------------------|---|------------------|-----|-----------------------------|
| Entnahmeleitung | | 100 | 150 | |
| Einleitung | | 100 | 150 | |
| Primärnetz | | 1.400 | 125 | 12 |
| Sekundärnetz | | 1.300 | | |
| Hafendorf | 320 | 500 | 65 | 2,42 |
| Seedorf | 260 | 350 | 65 | 0,60 |
| Walddorf | 40 | 350 | 32 | 0,15 |

TECHNISCHES KONZEPT UND WIRTSCHAFTLICHKEIT

| | | | | |
|----------------|-----|-----|----|------|
| Camping | 10 | 100 | 32 | |
| Summe | 630 | | | 15,2 |


Abbildung 59: Übersicht zu den Systemkomponenten Wärmeversorgung

Wesentliche Parameter für die Versorgung von rund 150 Gebäuden sind:

- ▶ Entnahmemenge: \varnothing ca. 288 m³/d (entspr. 0,00017 % des Seevolumens)
- ▶ Entnahmetemperatur: 3 – 23 °C (je nach jahreszeitlicher Schwankung)
- ▶ Einleittemperatur: 0 – 20 °C
- ▶ ΔT Entnahme / Einleitung: 0 – 3 °C

Die hier entwickelte technische Systemlösung (siehe Übersichtsdarstellung in Abbildung 60) ist als ein umsetzbares Referenzsystem für die Bewertung der genehmigungsrechtlichen Voraussetzungen und zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit konzipiert. Insbesondere eine integrale Entwicklung der Versorgungslösung gemeinsam mit der Gebäudehülle und der technischen Gebäudeausrüstung bieten signifikantes Verbesserungs- bzw. Optimierungspotential.

Der aktuelle Planungsstand zum Quartier am Nordufer des Zwenkauer Sees lässt einen solchen detaillierteren Variantenvergleich heute noch nicht zu. Erst im Zuge der weitergehenden Planung für die Bebauung am Standort kann das technische Konzept entsprechend tiefer ausgearbeitet werden.

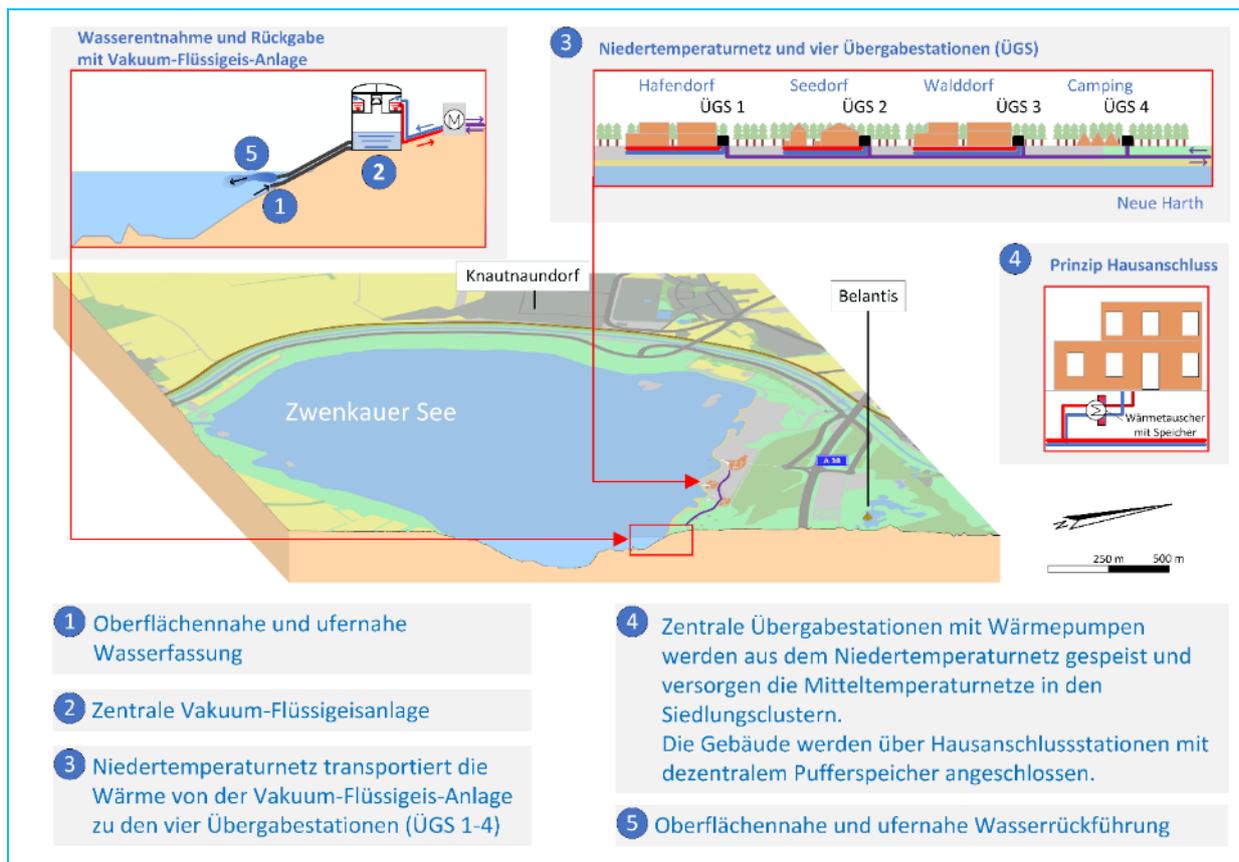


Abbildung 60: Darstellung der Elemente der Wärmeversorgung für das Quartier ‚Neue Harth‘

6.2 Wirtschaftlichkeit

6.2.1 Einführung

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Seethermie-Ansatzes wurde eine statische Gestehungskostenrechnung auf Vollkostenbasis in Anlehnung an die (VDI 2067) erstellt. Dabei werden grundsätzlich folgende Kostenbestandteile unterschieden:

1. Kapitalgebundene Kosten: Kapitalkosten als Annuität unter Berücksichtigung eines bestimmten Kapitalzinses und der technischen Nutzungsdauer jeder einzelnen Komponente.
2. Betriebsgebundene Kosten: Wartung, Instandhaltung, Betriebsführung und Versicherung als pauschaler Ansatz in % von Investitionskosten je nach Komponente (Details im Anhang).
3. Verbrauchsgebundene Kosten: maßgeblich Stromkosten, Netzpumpen, Wärmepumpen, Vakuüm-Flüssigeis-Anlage.

Zur Bestimmung der Stromkosten am konkreten Standort wurde ein technisches Modell zur Berechnung des Strombedarfes mit stündlicher Zeitreihe für ein beispielhaftes Jahr 2020 aufgebaut. Auf eine mehrjährige Korrektur der zugrunde gelegten Temperaturdaten wurde verzichtet, da nach Meinung der Autoren davon auszugehen ist, dass im Zuge des

TECHNISCHES KONZEPT UND WIRTSCHAFTLICHKEIT

verstärkten Klimawandels und damit steigender Jahrestemperaturen die Mitteltemperaturen vergangener Dekaden nicht mehr als Basis für Zukunftsprognosen herangezogen werden können. Die Eingangs- und Ergebnisgrößen sind in Abbildung 61 dargestellt.

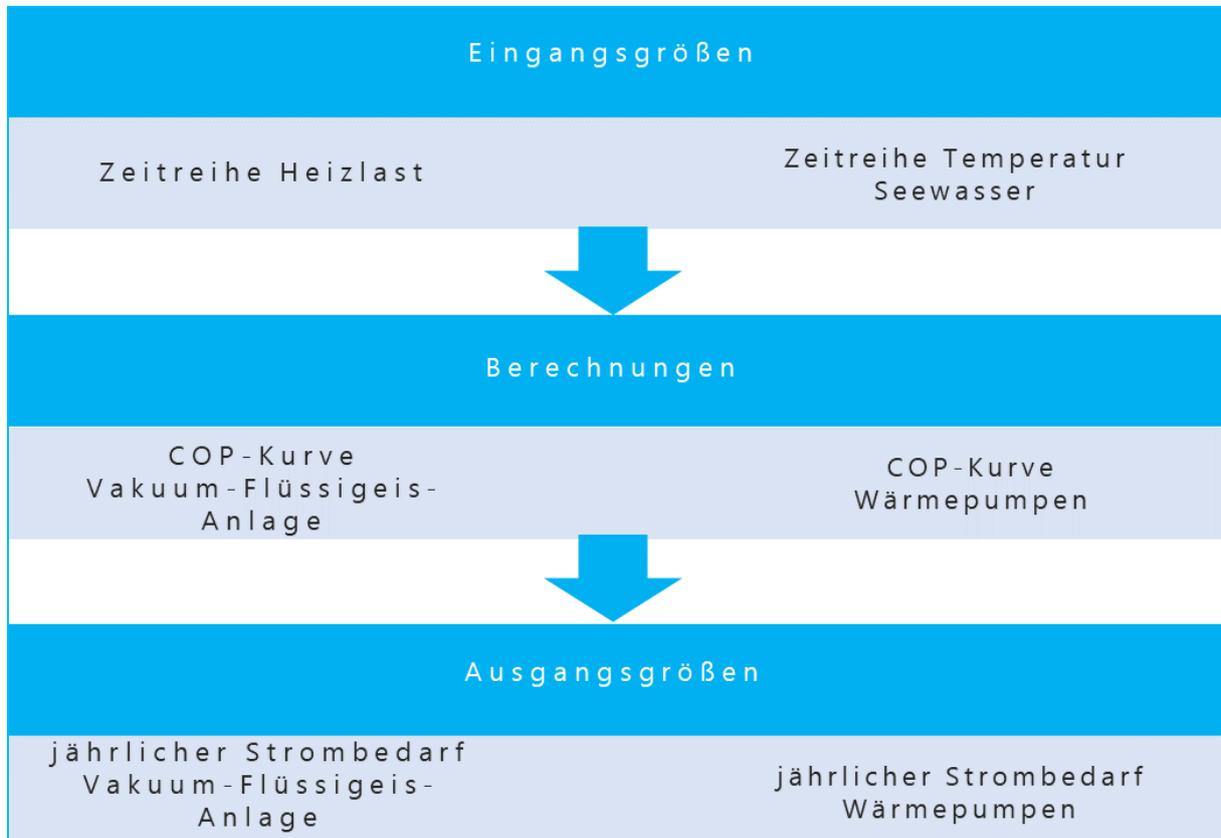


Abbildung 61: Aufbau des technischen Modells zur Berechnung des Strombedarfes

Die Investitionskosten für das Gesamtsystem werden mit ca. 2.807.505 € angegeben (eigene schätzende Erhebung nach aktuellen Marktpreisen). Die Anschlussleistung beträgt dabei 630 kW. Eine Detailaufstellung dieser Investitionskostenabschätzung ist dem Anhang 2 zu entnehmen.

Weitere Annahmen, die der Wirtschaftlichkeitsrechnung zugrunde gelegt wurden (wie Kapitalzins, Strompreis etc.) sind ebenfalls im Anhang aufgeführt. Tabelle 17 und Abbildung 62 stellen die ermittelte Kostenverteilung dar.

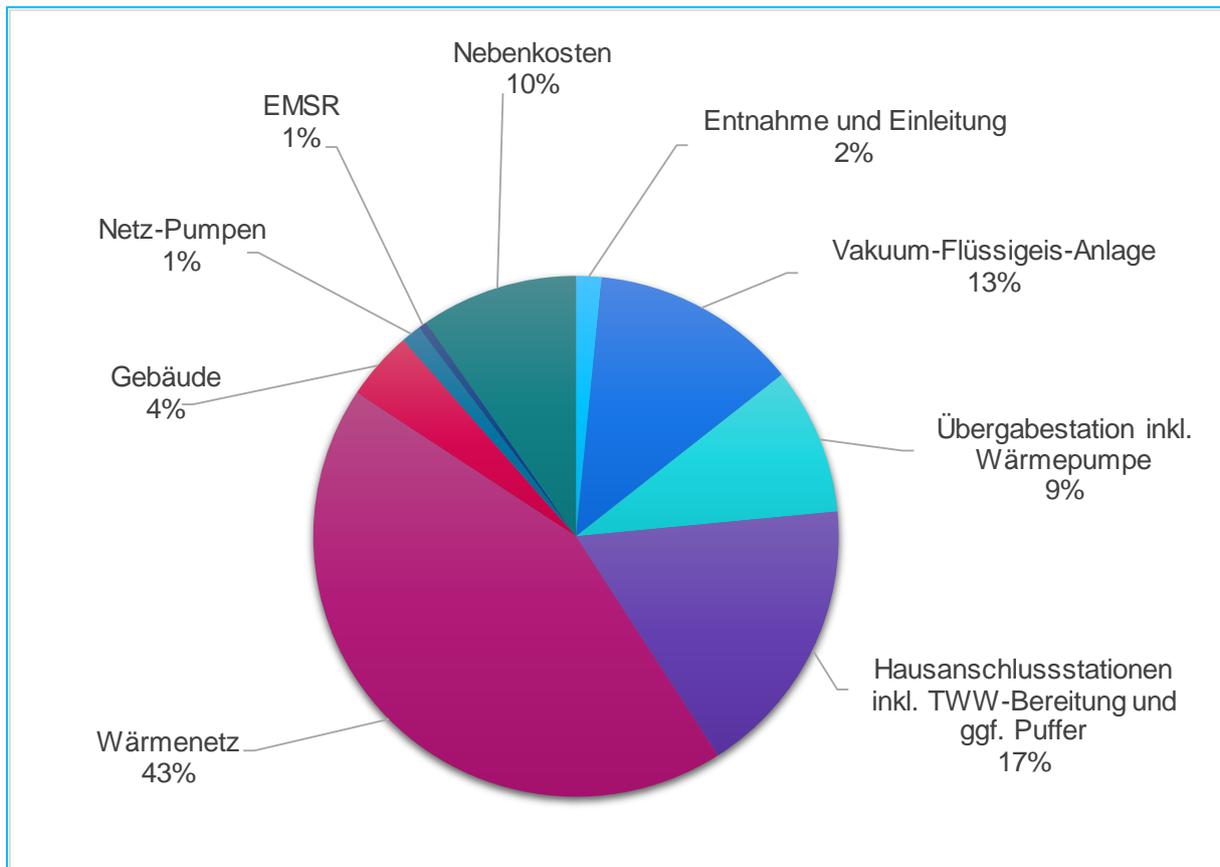


Abbildung 62: Verteilung der Gesamtkosten für die Investition

Die kapitalgebundenen Kosten werden aus den Investitionskosten mit hinterlegten Nutzungsdauern je Komponente ermittelt. Beispielsweise werden Wärmenetze 40 Jahre genutzt, wohingegen die Wärmepumpen bereits nach 15 Jahre ausgetauscht werden müssen. Als Kapitalzins wurden für die Berechnung 0,5 % angesetzt und daraus die jeweiligen kapitalgebundenen Kosten mittels der Annuitäten-Methode berechnet.

Betriebsgebundene Kosten wurden ebenfalls aus den Investitionskosten über Ansätze zu spezifischen Instandhaltungsaufwendungen zzgl. einer Betriebsführungspauschale von 10.000 €/a gebildet. Um den Betrieb zu gewährleisten, ist zudem eine spezielle MSR⁶-Technik notwendig. Diese ist neben den anderen Anlagenbestandteilen regelmäßig zu warten und instand zu halten, um ggf. Schäden durch Korrosion und Ausfällungen frühzeitig entgegen wirken zu können. Neben diesen Wartungskosten fallen auch Kosten für die regelmäßige Reinigung der Seewasserleitung (Vor- und Rücklauf) an.

Zur Berechnung der verbrauchsgebundenen Kosten wurde ein Strom-Mischpreis von 16 €/ct/kWh (netto) angesetzt. Dem zugrunde liegt die Annahme, dass ein Anteil von 40 % des benötigten Stromes durch eine Photovoltaikanlage vor Ort als Eigenstrom erzeugt werden kann und somit der Preis für Strom etwas geringer als aktuelle Netzbezugsbedingungen von ca. 22 €/ct/kWh ausfällt. Die benötigten Strommengen wurden aus dem Rechenmodell auf Basis stündlicher Lastgänge gebildet.

⁶ Mess-Steuer-Regel-Technik

Tabelle 17 und Abbildung 63 stellen die ermittelte Kostenverteilung dar. Für die Kostenbetrachtung wurde der Durchschnittswert über den Betrachtungszeitraum von 15 Jahren ermittelt, um zukünftige Kostensteigerungen mit abzubilden.

Tabelle 17: Jährliche Kosten nach Kostengruppen gemäß (VDI 2067)

| | VFA + WP | Einheit |
|--|-----------|----------|
| Investitionskosten | 3.146.017 | € |
| Jährliche Kapitalgebundene Kosten | 142.805 | €/Jahr |
| Durchschnittliche Wartungs- & Instandsetzungskosten | 29.932 | €/Jahr |
| Kosten Betriebsführung | 10.805 | €/a |
| Jährliche betriebsgebunden Kosten | 40.737 | €/a |
| Strombedarf Netzpumpen | 118.475 | kWh/Jahr |
| Durchschnittliche Stromkosten Netzpumpen | 24.244 | €/Jahr |
| Strombedarf Wärmepumpen | 395.446 | kWh/Jahr |
| Durchschnittliche Stromkosten Wärmepumpen | 80.923 | €/Jahr |
| Jährliche verbrauchsgebundene Kosten | 105.167 | €/Jahr |

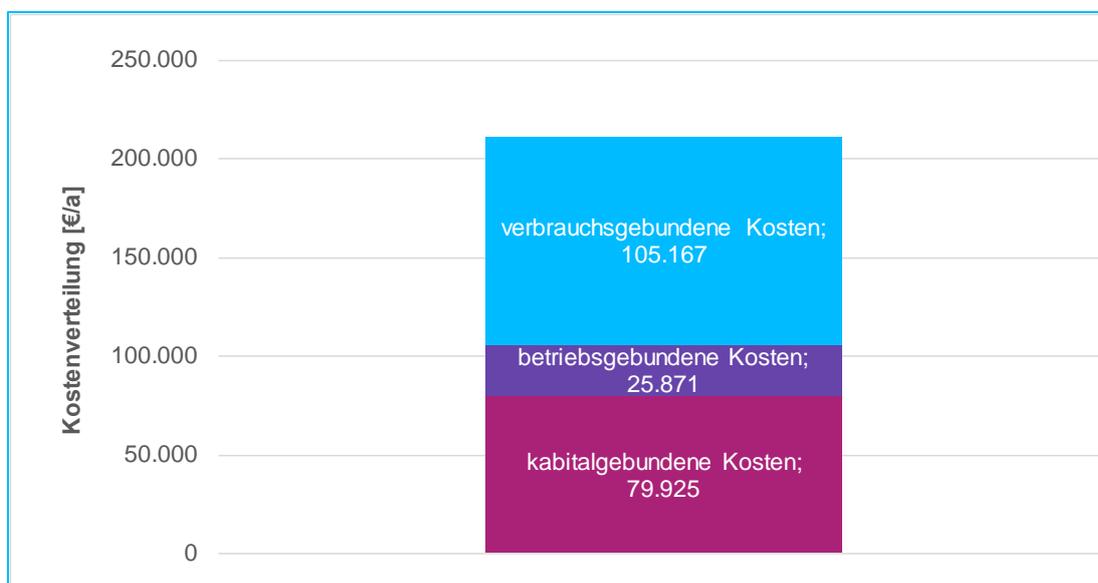


Abbildung 63: Jährliche Kosten nach Kostengruppen gemäß VDI 2067 ohne Förderung

Über die jährlichen Wärmebedarfe und die ermittelten Kosten wurde der Wärme-Mischpreis berechnet. Dieser wurde sowohl ohne als auch mit einer Inanspruchnahme von 30 % Fördermitteln (= 842.252 €) gerechnet.

Der mittlere Wärme-Mischpreis auf Vollkostenbasis beträgt für das erste Betriebsjahr inkl. einer 30%igen Investitionsförderung 13,69 €ct/kWh.

Ohne Förderung beträgt der Wärme-Mischpreis im ersten Betriebsjahr 16,75 €ct/kWh.

Dieses Ergebnis kann als eine erste Indikation für die Wirtschaftlichkeit einer Seethermie-Anlage gelten. Unsicherheiten liegen im Beginn einer technischen Entwicklung mit den damit verbundenen geringen Stückzahlen wie insbesondere bei der Vakuum-Flüssigeis-Anlage begründet. In Analogie zu den Lernkurven anderer erneuerbarer Energiesysteme sind in Zukunft signifikante weitere Verbesserungen zu erwarten.

6.2.2 Sensitivitäten

Auf Basis der Wirtschaftlichkeitsrechnung wurde eine Sensitivitätenbetrachtung der Eingangsparameter ‚Förderquote‘ (in % der Investitionskosten) und ‚Strompreis‘ vorgenommen und der Einfluss auf den Wärme-Mischpreis berechnet. Dabei kam die Software optiSlang der Firma Dynardo GmbH zum Einsatz. Der Strompreis wurde zwischen 0 und 35 €ct/kWh variiert. Die Förderquote wurde zwischen 0 und 80 % variiert. Der Einfluss auf den Wärmemischpreis ist in Abbildung 64 grafisch dargestellt.

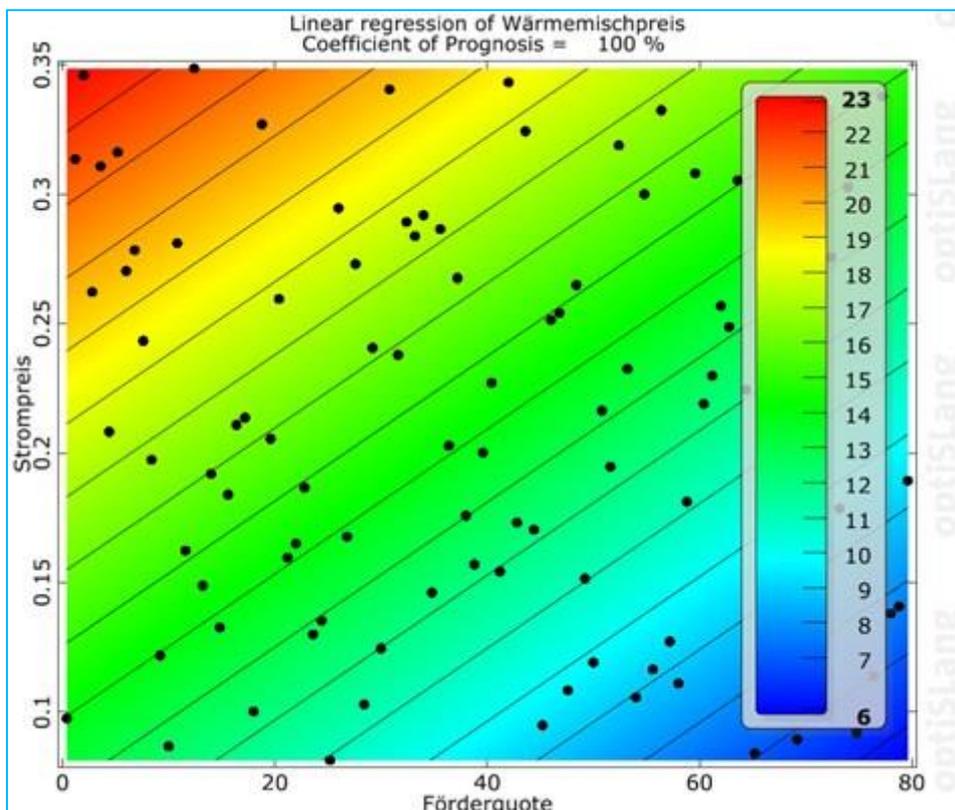


Abbildung 64: Einfluss des Strompreises (in €/kWh) und der Förderquote (in %) auf den Wärmemischpreis (in €ct/kWh)

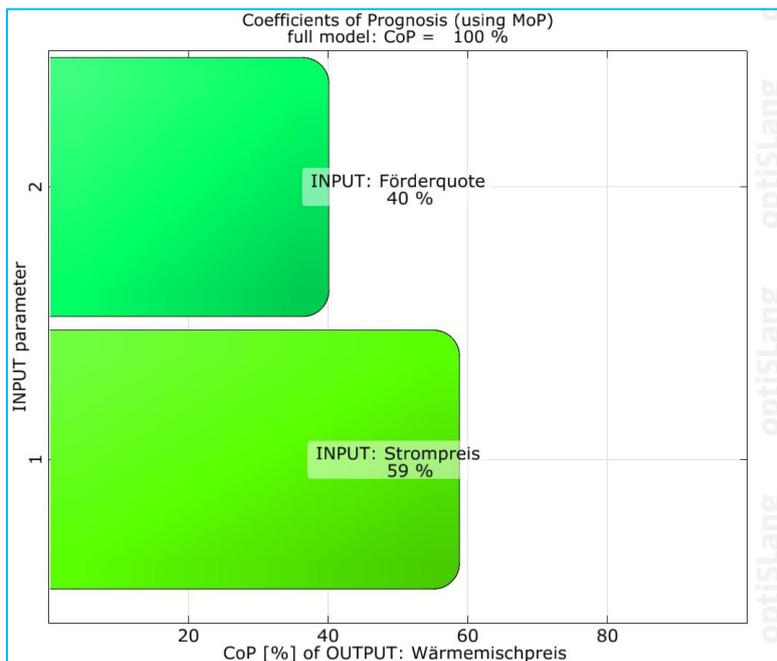


Abbildung 65: Einfluss der Variablen auf den Wärmemischpreis

Die Analyse der Einflussgröße zeigt, dass der Strompreis von beiden Variablen den größeren Einfluss auf den Wärme-Mischpreis hat (60 % Einfluss), wohingegen der Einfluss der Förderquote bei 40 % liegt (Abbildung 65). Folglich sollte bei der weiteren Projektplanung neben günstigen Förderbedingungen auch das Augenmerk auf langfristig günstige Strombezugsbedingungen gelegt werden. Dies bekräftigt die hier getroffene Annahme der anteiligen Versorgung über eigenerzeugten Strom aus Photovoltaik vor Ort. Die Quote an Strom aus Photovoltaik kann z.B. über lokale Strombelieferung aus benachbarten Photovoltaik-Anlagen oder durch die Integration von Speicherlösungen perspektivisch weiter verbessert werden. Dies ist bei der weiteren Konkretisierung des Vorhabens zu berücksichtigen.

6.2.3 Kostenvergleich

Diese Abwägung wurde auf Basis des Heizkostenvergleiches nach BDEW 2021 (ITG 2021) für Neubaugebäude mit 6 Wohneinheiten und einer beheizten Fläche von 605 m² und dem Mindestdämmstandard nach Gebäudeenergiegesetz (GEG) vorgenommen. Es wurden die Jahreskosten und die CO₂-Emissionen der verschiedenen Versorgungslösungen verglichen.

Die Vergleichssysteme des Heizkostenvergleiches sind nachfolgend kurz beschrieben:

- ▶ Gas-Brennwert-Gerät + solare Trinkwassererwärmung + Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung:
Die Wärmeerzeugung erfolgt durch ein Erdgas-Brennwertgerät mit zusätzlicher solarer Trinkwarmwasserbereitung und einer Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung.
- ▶ Sole-Wasser-Wärmepumpe + PV-Anlage + elektrischer Durchlauferhitzer + Abluftanlage:

Die Wärmeerzeugung erfolgt mittels Sole-Wasser-Wärmepumpe, welche aus dem Strom einer Photovoltaikanlage gespeist wird. Die Trinkwarmwasserbereitung erfolgt mittels elektrischem Durchlauferhitzer. Zudem ist eine Abluftanlage integriert.

- ▶ Nah-/Fernwärme + Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung:

Die Wärmeerzeugung erfolgt mittels Nahwärme/Fernwärme. Zudem ist eine Abluftanlage mit WRG integriert.

- ▶ Pelletkessel+ Abluftanlage:

Die Wärmeerzeugung erfolgt mittels Holzpellet-Kessel. Zudem ist eine Abluftanlage integriert.

Eine detaillierte Beschreibung der Vergleichssysteme findet sich in der genannten Quelle BDEW (2021).

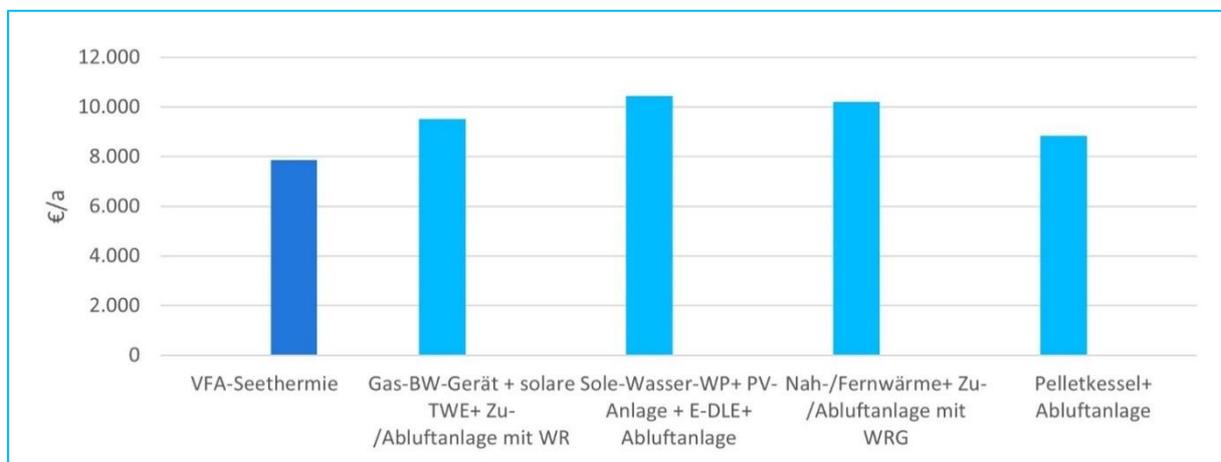


Abbildung 66: Heizkostenvergleich anhand des Neubaus 6-Familienhaus Mindeststandard GEG (nach BDEW-Heizkostenvergleich 2021), ohne Förderung

Die Ergebnisse zeigen, dass die Seethermie-Lösung bereits ohne Förderung mit ca. 7.860 €/a die günstigste Technologievariante darstellt (Abbildung 66).

Mit Förderung verbessert sich das Bild erwartungsgemäß weiter, sodass sich die Jahresvollkosten auf 6.260 €/a belaufen (Abbildung 67).

Einschränkend muss dabei angeführt werden, dass aufgrund der noch groben Planungsdaten die Schwankungsbreite groß ist und eine detaillierte Kalkulation der Gebäudetechnik wie beispielsweise die Nutzung einer Abluftanlage nicht betrachtet wurde.

Zusammenfassend kann jedoch gefolgert werden, dass die Wärmeversorgung mittels Seethermie bereits heute eine vergleichsweise wirtschaftliche Versorgungslösung darstellt.

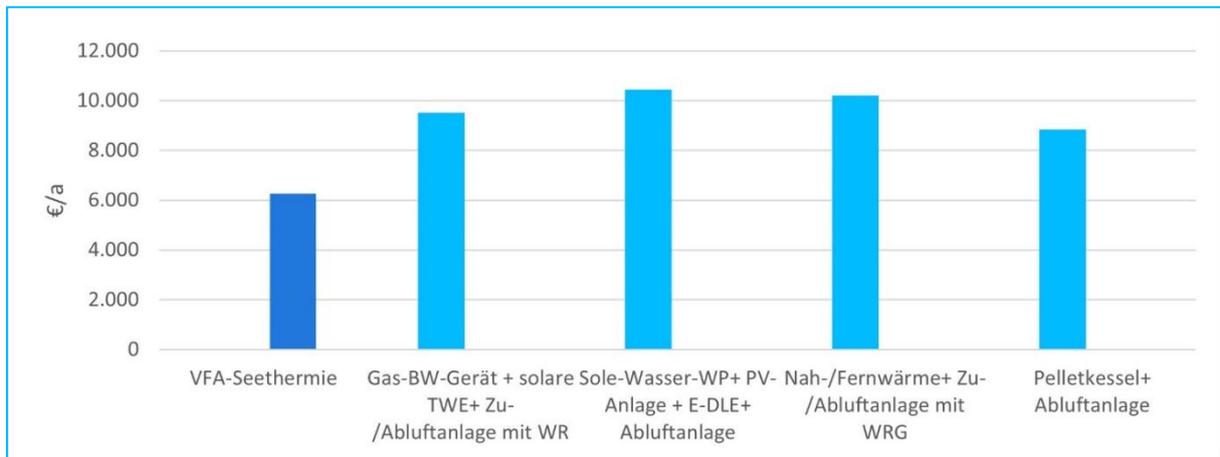


Abbildung 67: Heizkostenvergleich anhand des Neubaus 6-Familienhaus Mindeststandard GEG (nach BDEW-Heizkostenvergleich 2021), mit Förderung

6.2.4 CO₂-Emissionen

Es wird angenommen, dass der Strom anteilig aus Photovoltaik (60 % Netzstrom 401 g/kW_{Strom} = 240 g/kWh, Rest PV-Strom zu 0 g/kWh) zur Verfügung gestellt wird. Bezogen auf die erzeugte Wärme wurden damit CO₂-Emissionen von insgesamt 90,6 g/kWh_{Wärme} ermittelt. Hinsichtlich der CO₂-Emissionen liegt die Seethermie nach dem Pelletkessel auf dem 2. Platz. Bemerkenswert ist, dass sie damit auch besser als herkömmliche Sole-Wasser-Wärmepumpenlösungen abschneidet. Dies liegt neben der hier nicht näher betrachteten Trinkwarmwasserbereitung und dem Aufwand etwaiger Belüftungstechnik auch maßgeblich an der verbesserten Effizienz der Vakuum-Flüssigeis-Technologie im Winter, wie eingangs in dieser Studie beschrieben wurde.

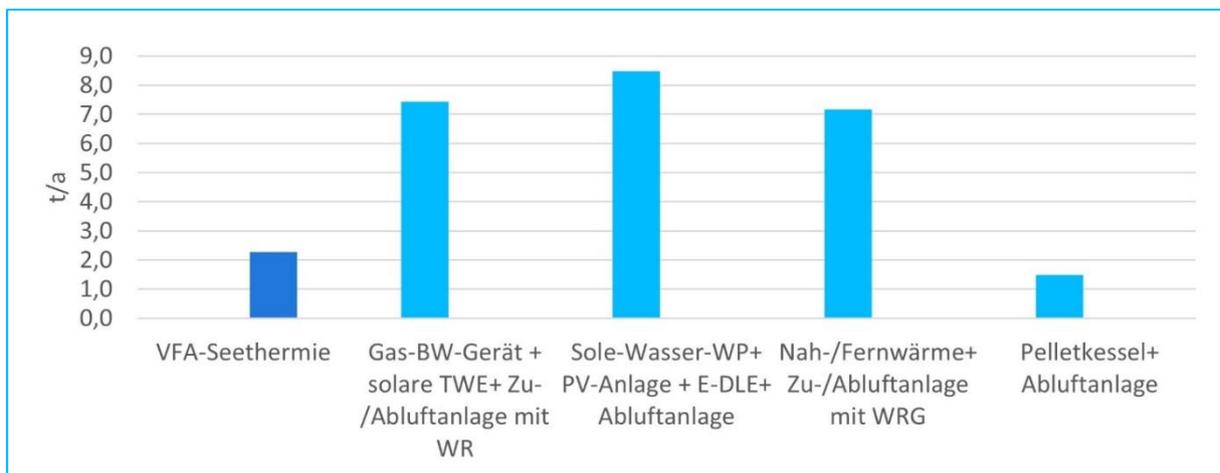


Abbildung 68: CO₂-Emissionen anhand des Neubaus 6-Familienhaus Mindeststandard GEG (nach BDEW-Heizkostenvergleich 2021).

6.2.5 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Am konkreten Beispiel des exemplarischen Standortes wird gezeigt, dass die Nutzung der Seethermie bereits heute wirtschaftlich gestaltet und im Vergleich mit aktuellen Lösungen zur Gebäudebeheizung mit geringeren Kosten geführt werden kann.

Einzig ein Holzpelletkessel schneidet hier besser ab. Ein Vorteil der Seethermie gegenüber diesem ist jedoch der emissionsfreie Betrieb, der auch ohne Lagerhaltung für Brennstoffe auskommt.

Auch die CO₂-Bilanz stellt sich günstiger als drei der vier Vergleichstechnologien dar. Sie wird sich zukünftig in dem Maße weiter verbessern, wie die Stromerzeugung in Deutschland dekarbonisiert wird.

Einschränkungen zu den positiven Aussagen liefern in erster Linie noch bestehende Unsicherheiten bei den Investitionskosten. Ein detaillierter Variantenvergleich sollte erfolgen, wenn die Planung am konkreten Standort weiter vorangetrieben wird. Die dann tatsächlich benötigten Temperaturen können die Wirtschaftlichkeit weiter beeinflussen.

Beim Blick in die Zukunft werden folgende Begleitumstände Einfluss auf die Wahl der Energiesysteme haben:

- ▶ Bis 2025 soll die Installation neuer Ölkessel untersagt werden; die europäische Versorgung soll bis 2050 komplett ohne fossile Brennstoffe auskommen.
- ▶ Konventionelle Systeme lassen sich schlecht oder gar nicht dekarbonisieren, was die steigende CO₂-Bepreisung zu einem schwer kalkulierbaren Einflussfaktor werden lässt (siehe Abbildung 69).

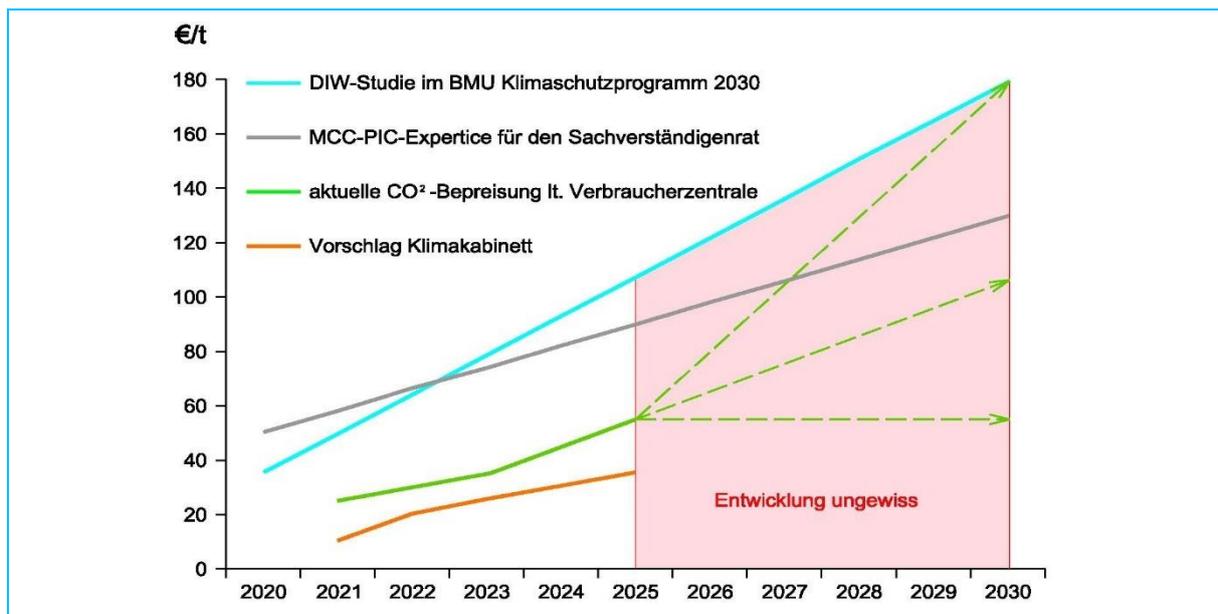


Abbildung 69: CO₂-Bepreisung- Zusammenstellung aus verschiedenen Quellen (siehe Legende)

TECHNISCHES KONZEPT UND WIRTSCHAFTLICHKEIT

Mit Blick auf die Transformation ist zu antizipieren, dass sich die Wirtschaftlichkeit der Seethermie weiter verbessern wird:

- ▶ Die beschriebene Technologie ist geeignet, einen erheblichen Anteil des benötigten Stromes aus Photovoltaik zu beziehen. Dies wirkt sich auch auf den Kostenvergleich aus. Zudem sind bei selbsthergestelltem Strom keine nennenswerten Preissteigerungen zu erwarten.
- ▶ Die Vakuum-Flüssigeis-Technologie kommt im Gegensatz zur herkömmlichen Wärmepumpe ohne chemische Substanzen aus. Aus diesem Grund ist keine Betriebszeitgrenze durch die Umweltgesetzgebung zu erwarten.
- ▶ Die anfallenden Kosten für eine Seethermie-Anlage sind von der Größe der geplanten Anlage und von der Morphologie des Sees abhängig. Das betrachtete Beispiel am exemplarischen Standort kann in Bezug auf die großen Potenziale des Sees als eine ‚kleine Variante‘ eingestuft werden. Die Wirtschaftlichkeit wird bei einer größeren Skalierung Anwendung, bei einem dichteren Verbrauchernetz und mit höherer Auslastung deutlich verbessert. Eine große Flachwasserzone hingegen würde eine lange Seewasserleitung erforderlich machen und sich negativ auf die Investitionskosten auswirken.
- ▶ Die vergleichsweise geringen Vorlauftemperaturen im System lassen auch eine Kalkulation mit Kunststoffrohr als Rollenware mit deutlich weniger Wärmetransportverlusten, günstigeren Investitionskosten und einer längeren Betriebszeit zu.
- ▶ Weitere positive Effekte sollten durch die Lernkurve der neuen Technologie Vakuum-Flüssigeis-Anlage, durch Synergieeffekte bei der Erschließung neuer Quartiere und durch die positive Botschaft CO₂-freier Versorgung auftreten.

Durch die Kombination der Seethermie mit hocheffizienten und modulierfähigen Wärmepumpen kann das System im Regelenergiemarkt eine nützliche Rolle zur Kosteneffizienz zukünftiger Versorgungsstrukturen spielen.

6.3 Förderung und geldwerte Vorteile der Seethermie

6.3.1 Förderung

In der Wirtschaftlichkeitsrechnung wurde eine Variante mit einer pauschalen Förderquote von 30 % auf die Investitionskosten unterstellt, wie es bei gängigen Förderprogrammen wie z.B. dem Förderprogramm Wärmenetze 4.0 des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) der Fall ist. Ein detailliertes Fördermittelkonzept muss dann bei weitergehender Konkretisierung des Vorhabens erarbeitet werden. Weitere in-frage kommende Programme seien nachfolgend erwähnt:

1. Komponenten:

Zurzeit werden Wärmepumpen, Sonnenkollektoren und Pufferspeicher über das aktuelle Marktanzreizprogramm (MAP) des BAFA im Regelfall mit 30 % der Investitionskosten als Zuschuss gefördert



2. Systeme:

- a) Je nach Zusammenstellung der benötigten Investitionen stehen momentan verschiedene Programme der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) mit zinsverbilligten Krediten zur Verfügung. Die große Zahl der unterschiedlichen Programme und deren dynamische Anpassung lassen eine detaillierte Darstellung hier nicht zu.
- b) Besonders erwähnenswert ist das gerade in der Anpassung befindliche Programm „Wärmenetze 4.0“, welches zurzeit abhängig vom Prozentsatz der verwendeten erneuerbaren Energie bis zu 50 % von maximal 30 Mio. € als Zuschuss unterstützt. Darüber hinaus fördert dieses Programm auch die Machbarkeitsstudie bis zu 60 %, die wissenschaftliche Begleitung bis zu 100 % und die Öffentlichkeitsarbeit über 3 Jahre.
- c) Kommunale Projekte werden wegen deren Vorbildwirkung und der haushaltsentlastenden Wirkung besonders gefördert. Hier sind verschiedene Programme des Bundes über den Projektträger Jülich (PtJ) bekannt. Das Leipziger Projekt KUWEA im Klinikum St. Georg wird zum Beispiel mit 80 % von 6,5 Mio. € bezuschusst.
- d) Als besonders herausragend, öffentlichkeitswirksam oder zukunftsweisend eingestufte Projekte können als ‚Pilotprojekte‘ mit kumulierenden Programmen bis zu 100 % förderfähig werden. Hier ist grundsätzlich eine Einzelfall-Prüfung / -Recherche notwendig.

6.3.2 Geldwerte Vorteile

Neben den bewerteten Effekten der Seethermie können folgende nicht-quantifizierbare Effekte als Vorteile angeführt werden und für eine weitere Verbreitung der Seethermie genutzt werden:

1. Die thermische Seewassernutzung ist in der Kombination mit der Produktion der Antriebsenergie z.B. aus Photovoltaik oder biogen angetriebenem BHKW bis zu 100 % CO₂-frei – und damit vollständig von der CO₂-Bepreisung sowie deren zukünftigen Entwicklung befreit.
2. Speziell am Beispiel der zukünftigen touristischen Nutzung am Nordufer des Zwenkauer Sees kann das Argument ‚CO₂-freier Urlaub‘ mit seinem positiv besetzten Image die Nachfrage und Auslastung erhöhen.
3. Das entwickelte System arbeitet ohne umweltbelastende Materialien, Energieträger und Betriebsstoffe und lässt damit keine Betriebszeitbegrenzung durch sich ggf. verschärfende Umweltgesetzgebung erwarten. Damit kann dem System eine hohe Zukunftsfähigkeit bescheinigt werden.

TECHNISCHES KONZEPT UND WIRTSCHAFTLICHKEIT

4. Die Betriebsführung als ‚kaltes, intelligentes Wärmenetz‘ ist offen gegenüber allen zukünftigen Erweiterungen (Einbindung der Nachbarn, wie dem Themenpark ‚Belantis‘ und/oder der Spitzenlastversorgung mit Grünschnittpellets). Das System ist damit für Lern- und Skaleneffekte offen gestaltet.
5. Als zusätzliche (im Zusammenhang mit weiteren Planungen zu überprüfende) Nutzung ist auch die Kühlung denkbar, wenn:
 - a) das dann erwärmte Wasser als Gießwasser in den Parkanlagen genutzt wird (Beispiel: UNO-Gebäude, Genfer See, Schweiz),
 - b) zur Pool- oder Lagunenbeheizung nachgenutzt wird,
 - c) die Wärmenutzung größer als die Nutzung für die Kühlung ist.



7 Genehmigungsfähigkeit

7.1 Rechtliche Grundlagen

Die übergeordnete Grundlage für alle rechtlichen Regelungen zum Gewässerschutz ist die EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL 2000), die als zentraler Punkt den Schutz aller Gewässer auf eine ökologische Basis stellt. Es sind Maßnahmen zu ergreifen, die die Erreichung des „guten chemischen Zustands“ und des „guten ökologischen Zustands“ bzw. bei erheblich veränderten oder künstlichen Wasserkörpern des „guten ökologischen Potenzials“ sicherstellen. Dies beinhaltet ein Verschlechterungsverbot durch anthropogene Nutzungen des Wasserkörpers ((EG-WRRL 2000) Art. 4). Während als Kriterien für den „guten chemischen Zustand“ physikalisch-chemische Qualitätskomponenten mit der Vorgabe von Umweltqualitätsnormen festgelegt werden, kommen für die Festlegung des „guten ökologischen Zustands“ bzw. „guten ökologischen Potenzials“ biologische Qualitätskomponenten zur Anwendung.

Das System der Bewertung des ökologischen Zustands von Gewässern beinhaltet die Typisierung von Gewässern anhand ihrer spezifischen geographischen, geochemischen und strukturellen Charakteristika mit darauf basierenden Referenzbiozönosen, wie sie unter anthropogen unbeeinflussten natürlichen Bedingungen vorkommen. Als Qualitätskomponenten dienen gut zu erfassende Organismengruppen (z.B. Phytoplankton, Makrophyten, Makrozoobenthos, Fische). Die Gesamtlebensgemeinschaft wird mit Hilfe ökologischer Parameter, wie z.B. Artenzahl, Biomasse und Dominanzstruktur, analysiert und entsprechend ihrer Abweichung vom Referenzzustand bewertet (BMU 2014–2021). Umsetzungen der EG-WRRL in nationalen Rechtsvorschriften finden sich in der Oberflächengewässerverordnung des(OGewV 2016, (BMU 2016)) und im Wasserhaushaltsgesetz (WHG 2009 (BMU 2009)) auf Bundesebene.

Die Gültigkeit der OGewV und dementsprechend die Bewirtschaftungsziele der WRRL gelten bei Standgewässern für Gewässer mit einer Oberfläche größer 0,50 km² (vgl. OGewV 2016, Anlage 1, 2.2 (BMU 2016)). Im Fall der vorliegenden Studie ist dieses Kriterium zutreffend. Der Zwenkauer See besitzt eine Fläche von ca. 9,7 km². Für andere See- und Gewässer im Neuseenland ist dies im Einzelfall zu prüfen. Der Mittelwert der Flächen bspw. der Seen des „Neuseenlands“ betrug mit Stand 2008 nur 0,47 km² (Czegka et al. 2008).

Die Umsetzung auf Ebene der Länder regeln Landeswassergesetze wie das Sächsische Wassergesetz (SächsWG 2013 (LfULG 2013)), das Brandenburgische Wassergesetz (BbgWG 2017) und das Thüringer Wassergesetz (ThürWG 2019 (TLUBN 2019)).

In der EG-WRRL wird die Temperatur als physikalisch-chemische Qualitätskomponente explizit benannt (Anhang V (EG-WRRL 2000)). So ist der gute Zustand nur gegeben, wenn „die Werte für die Temperatur, ... nicht über den Bereich hinaus(gehen), innerhalb dessen die Funktionsfähigkeit des Ökosystems ... für die biologischen Qualitätskomponenten gewährleistet“ ist (L 327/44 (EG-WRRL 2000)).

In Deutschland gibt es bisher noch keine Gesetze, die die Nutzung thermischer Energie aus Seewasser explizit regeln. Eine etwaige Gewässernutzung fällt in den Einflussbereich des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG). Folgende wichtige Formulierungen sind hier aufgeführt:

- ▶ § 8 „(...) Benutzung eines Gewässers bedarf der Erlaubnis“
- ▶ § 9 „Benutzung (...) 1. Entnehmen und Ableiten von oberirdischen Gewässern“
- ▶ § 10 „Erlaubnis gewährt Befugnis, ein Gewässer für bestimmten Zweck zu benutzen“
- ▶ § 14 (1) „Bewilligung zur Gewässernutzung darf nur erteilt werden, wenn (...) 2. Einem bestimmten Zweck dient, der nach bestimmtem Plan verfolgt wird (...)“
- ▶ § 14 (2) „Bewilligung wird für bestimmte angemessene Frist erteilt“
- ▶ § 36 „Anlagen sind so zu betreiben, dass keine schädlichen Gewässerveränderungen zu erwarten sind“
- ▶ § 33 „Entnehmen oder Ableiten nur zulässig, wenn Wassermenge erhalten bleibt“

Die Gesetzgebung liegt demnach beim Bund, jedoch besitzen die Länder die Möglichkeit, eigene Regelungen zu treffen, solange sich diese im Rahmen des Wasserhaushaltsgesetzes bewegen (Kammer et al. 2015). Die erforderliche Erlaubnis zur Nutzung wird durch die landeseigenen Wasserbehörden geprüft und erteilt.

Nach § 1 Abs. 2 Nr. 3 SächsWG entfällt die Anwendung des WHG, wenn das Gewässer als Teil eines Grundstücks einzuordnen ist, das zu anderen nicht-wasserwirtschaftlichen Zwecken (insbesondere Fischzucht) genutzt wird und nicht mit einem anderen Gewässer oder nur künstlich damit verbunden ist. Dieser Umstand ist in der vorliegenden Fallstudie nichtzutreffend und wird auch im Sinne der Übertragbarkeit der Studienergebnisse auf andere Gewässer eher die Ausnahme darstellen.

In Sachsen wird zudem ein „Wasserentnahmeentgelt“ erhoben (LfULG 2013) (SächsWG, 2013). Diese Abgaben werden durch den § 91 „Abgabe für Wasserentnahme“ des Sächsischen Wassergesetzes geregelt. Darüber hinaus wird geklärt, unter welchen Voraussetzungen keine Abgaben erfolgen. Diese sind unter Absatz 4 desselben Paragraphen erläutert.

Hierbei entfällt eine Abgabe in Bezug auf die Seethermie für:

- ▶ „erlaubnisfreie Gewässerbenutzung im Sinne § 8 Abs. 2 und 3, §§ 25, 26 und 46 WHG“ (§ 91 Abs. 4 Pkt. 1)
- ▶ „Wasserentnahme und Ableitung von Wasser aus oberirdischen Gewässern zur unmittelbaren Wasserkraftnutzung und Wärmegewinnung“ (§ 91 Abs. 4 Pkt. 3)
- ▶ „Benutzungen, bei denen die Wasserentnahmemenge insgesamt weniger als 2000 m³ im Kalenderjahr beträgt“ (§ 91 Abs. 4 Pkt. 7).

Die Installation und der Betrieb von Anlagen, die die Gewässertemperatur verändern, stellen eine Gewässernutzung dar, für die eine wasserrechtliche Erlaubnis gem. § 8 des

WHG im Rahmen eines wasserrechtlichen Erlaubnisverfahrens erforderlich ist, das in der Regel von der unteren Wasserbehörde durchgeführt wird. Die thermische Nutzung fällt potenziell unter die „Maßnahmen, die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß nachteilige Veränderungen der Wasserbeschaffenheit herbeizuführen“ (§ 9 Abs. 1 Nr. 2(4) WHG). Folglich ist die Wärmegewinnung aus einem Gewässer als eine erlaubnispflichtige Benutzung gem. § 9 WHG zu klassifizieren. Die Anlage ist „so zu errichten, zu betreiben, zu unterhalten und stillzulegen, dass keine schädlichen Gewässerveränderungen zu erwarten sind“ (§ 36 Abs. 2 WHG). Eine Erlaubnis zur thermischen Gewässernutzung ist insbesondere dann zu versagen, „wenn schädliche, auch durch Nebenbestimmungen nicht vermeidbare oder nicht ausgleichbare Gewässerverunreinigungen zu erwarten sind“ (§ 12 Abs. 1 Nr. 1 WHG). Nicht unerheblich ist, dass „die Erteilung der Erlaubnis und der Bewilligung im pflichtgemäßen Ermessen (Bewirtschaftungsermessen)“ steht (§ 12 Abs. 2 WHG), was den Behörden einen Entscheidungsspielraum eröffnet.

Abgeleitet aus den rechtlichen Vorgaben kann die wasserrechtliche Erlaubnis dann nicht versagt werden, wenn nachteilige Veränderungen der Eigenschaften des Gewässers nicht zu erwarten sind. Dies betrifft neben der physikalisch-chemischen Beschaffenheit und der biologischen Besiedlung auch die Gewässerstruktur, die durch die Anlagen beeinträchtigt werden könnte, die im Zusammenhang mit der thermischen Gewässernutzung im und unmittelbar am Gewässer errichtet werden.

Einer Prüfung unterzogen werden müssen im Zusammenhang mit der thermischen Gewässernutzung insbesondere:

- ▶ die Möglichkeit des Auftretens gewässerökologischer Veränderungen, die sich in Änderungen der biozönotischen Strukturen (Artenzusammensetzung, Biomasse, Dominanzstrukturen) zeigen,
- ▶ die Auswirkungen der Entnahme- und Rückleitungsanlagen auf die Gewässerstruktur, was in Seen im Gegensatz von Fließgewässern von nur geringer Relevanz ist,
- ▶ mögliche Beeinträchtigungen bestehender Nutzungen, was in Seen die Nutzungen als Bade- und Angelgewässer betreffen kann.

Während es in der Oberflächengewässerverordnung für Fließgewässer hinsichtlich Temperaturveränderungen und der maximal zulässigen Temperatur Anforderungen an den durch die Gewässernutzung nicht zu beeinträchtigenden sehr guten bzw. guten ökologischen Zustand und das höchste bzw. gute ökologische Potenzial gibt, werden für Seen keine entsprechenden Vorgaben gemacht. Für Fließgewässer beträgt die maximal zulässige Temperaturerhöhung in Abhängigkeit vom Gewässertyp und der Fischgemeinschaft zwischen 0 K im Sommer bzw. ≤ 1 K bis ≤ 3 K im Winter für den sehr guten ökologischen Zustand und zwischen ≤ 1 K bis ≤ 3 K über das gesamte Jahr für den guten ökologischen Zustand (Anlage 7 Nr. 1.1.1. und 2.1.1 OGEV (BMU 2016)). Verminderungen der Temperatur werden nicht berücksichtigt.

Eine Richtlinie für die thermische Nutzung von Seewasser liegt beispielsweise für den Bodensee vor (IGKB 2018), die den zuständigen Genehmigungsbehörden einen Leitfaden

bei der Entscheidungsfindung an die Hand gibt. Die Bodensee-Richtlinie erlaubt die thermische Seewassernutzung, wenn allgemein sichergestellt ist, dass weder im See als Ganzes noch lokal seine Lebensgemeinschaften beeinträchtigt werden, was mit den o.a. Bestimmungen der EG-WRRL (2000) und der OGewV (2016) konform geht. Die maximale Änderung der Temperatur im Bereich der Rückleitstelle muss außerhalb einer Mischungszone von 20 x 20 m horizontaler und 10 m vertikaler Ausdehnung unter 1 K bleiben. Die Wasserentnahme kann in einer Tiefe zwischen 0 und 40 m erfolgen. „Die Rückgabtiefe ist ... so zu wählen, dass die Einschichtung in einem Bereich zwischen 20 und 40 m Wassertiefe erfolgt“ (IGKB 2018), Kap.5.2.2).

Weitere Anforderungen an die thermische Seewassernutzung ergeben sich bspw. auch, wenn ein bestehendes Gewässer wildlebende bzw. geschützte Arten beherbergt. Gemäß § 39, 44 BNatSchG sind unter Umständen die Vorschriften des Naturschutzes, insbesondere des Artenschutzes zu berücksichtigen.

In der Gesamtheit ist festzustellen, dass mehrere Genehmigungsbehörden und deren verschiedene Sachgebiete an einem Genehmigungsverfahren beteiligt sein werden. Im Fall der vorliegenden Studie lassen sich konkret die folgenden Institutionen benennen:

- ▶ Umweltamt Landratsamt Landkreis Leipzig mit den Sachgebieten
 - Wasser / Abwasser
 - Natur- und Landschaftsschutz
 - Immissionsschutz
- ▶ LMBV - Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH
- ▶ Stadt Zwenkau

Festzuhalten ist, dass das Genehmigungsverfahren die Beantragung einer wasserrechtlichen Erlaubnis in Bezug auf Entnahme und Einleitung von Wasser aus dem Wasserkörper sowie eine wasserrechtliche Genehmigung für Anlagen am Gewässer bzw. in Gewässernähe umfasst. Im Genehmigungsverfahren werden beide gemeinsam beantragt, sind aber in ihrer Sache Antragstellungen mit unterschiedlichen Anforderungen.

Sonderfall Tagebaurestseen: Bergrecht

Befindet sich ein Tagebaurestsee noch im Bergrecht, gelten grundlegend andere Voraussetzungen für eine seethermische Nutzung.

Grundlegend ist die Nutzung von Erdwärme (im weiteren Sinne die Nutzung von Wärme und Kälte aus dem Gewässer) ein bergfreier Bodenschatz (§ 3 BergG). Das Eigentum eines Grundstücks erstreckt sich nicht auf bergfreie Bodenschätze.

Für eine Nutzung von Energie aus einem Gewässer sind verschiedene bergrechtlichen Zulassungen erforderlich. Dazu gehören (UBA 1982):

1. Erlaubnis zur Aufsuchung eines Bodenschatzes (§ 7 BbergG)
2. Bewilligung zur Aufsuchung und Gewinnung eines Bodenschatzes (§ 8 BbergG) in Verbindung mit den Regelungen zum Bergwerkseigentum (§ 9 BbergG)

3. Aufstellung von Betriebsplänen (Betriebsplanpflicht) für Errichtung und Führung eines Betriebs zur Aufbereitung von Bodenschätzen (§ 51 u. 52 BbergG)

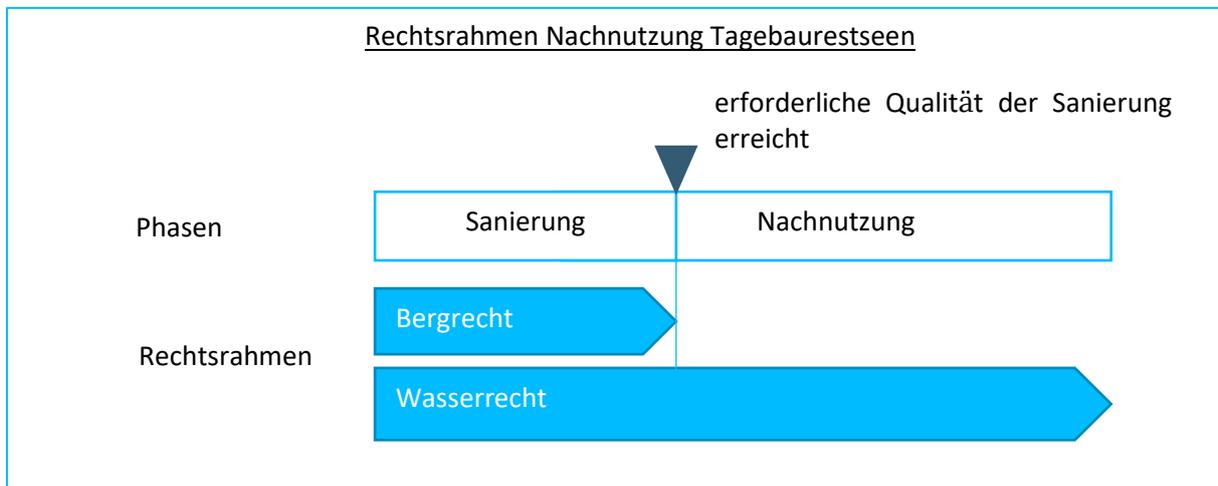


Abbildung 70: Rechtsrahmen Nachnutzung Tagebaurestseen

Befindet sich ein Gewässer (noch) im Bergrecht, so gelten bei der Nutzung dieses Gewässers für die seethermische Nutzung aber grundlegend auch die Anforderungen des Wasserrechts (EG-WRRL, WHG, OGewV, Landeswassergesetze). Bundesberggesetz und Wassergesetze gelten daher parallel (Abbildung 70).

Für den Zwenkauer See ist diese Situation gegeben, da die notwendigen Sanierungsmaßnahmen im bzw. am Gewässer noch nicht abgeschlossen sind. Erst nach Abschluss dieser Sanierungsmaßnahmen kann das Gewässer aus dem Bergrecht entlassen werden.

7.2 Genehmigungsfähigkeit

Trotz der hochgesteckten Ambitionen der Energiewende und der Erfahrungen benachbarter Länder führt die thermische Seewassernutzung in Deutschland ein Nischendasein (Kammer 2018). Die Ursachen dafür sind vielfältig. Eine wesentliche Ursache wurde durch eigene Recherchen im wasserrechtlichen Vollzug ausgemacht.

Eine landseitig aufgestellte Wärmepumpenanlage mit Entnahme und Wiedereinleitung von Seewasser stellt eine Gewässerbenutzung (Entnahme bzw. Einleitung) dar, die nach § 8 bzw. § 9 WHG einer wasserrechtlichen Erlaubnis bedarf. Die Zuständigkeit dafür liegt bei den Unteren Wasserbehörden (UWB).

Die Errichtung von Seethermie-Anlagen unterliegt nicht der Pflicht zur Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP). Die Anlage 1 (Liste „UVP-pflichtige Vorhaben“) des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) sieht Seethermie-Anlagen explizit nicht vor. Das heißt, dass für die Beantragung von Seethermie-Anlagen grundsätzlich keine Umweltverträglichkeitsprüfung, also die Überprüfung der Auswirkungen der Maßnahmen auf umweltbezogenen Schutzgüter, durchzuführen ist. Nach aktuellem Stand liegen den UWB keine weiterführenden fachlichen Ausarbeitungen vor, auf deren Grundlage sie den Antragsgegenstand bewerten und ihre Entscheidung begründen könnten. Bislang widmet sich in Deutschland ausschließlich die Bodenseerichtlinie (IGKB 2018)

dieser Thematik. Es stellt sich die Frage, inwieweit die Bodenseerichtlinie den UWB bei der Beurteilung von Seethermie-Anlagen auf Bergbaufolgeseen hilfreich sein kann.

Der Bodensee ist mit einer Fläche von 536 km² und einem mittleren Wasservolumen von 48 km³ um ein Vielfaches größer als die Bergbaufolgeseen im Mitteldeutschen und Lausitzer Braunkohlenrevier, die an sich schon nicht zu den kleinen Binnenseen zählen.

Die Bodenseerichtlinie (2018) stellt jedoch keinen Bezug zwischen einer thermischen Nutzung (installierte Leistung, entzogene oder eingeleitete Wärmemenge) und der Größe des Sees (Fläche, Volumen, Tiefe) her. Insofern gibt es formal kein Hindernis für die Anwendung der Bodenseerichtlinie (2018) auf Bergbaufolgeseen (IGKB 2018).

Als Hauptkriterium für die thermische Nutzung von Seen wird in der Bodenseerichtlinie (2018) eine maximal zulässige Änderung (Erhöhung als auch Erniedrigung) der Wassertemperatur von 1 K in einem definierten Wasservolumen postuliert. Das Wasservolumen wurde mit 20 x 20 m in der Fläche und 10 m in der Tiefe festgelegt. Die Bodenseerichtlinie geht weiter davon aus, dass das thermisch genutzte Wasser an einer Kante dieses Quaders mit einem bestimmten Impuls eingeleitet wird. Dieser Impuls breitet sich schließlich im Quader aus, dabei dispergiert er nach bekannten hydraulischen Regeln der Strahlausbreitung quer zur Strömungsrichtung, schichtet sich entsprechend dem Temperaturprofil des Sees in den See ein und verlässt den Bewertungsquader auf der gegenüberliegenden Seite mit einer definierten Temperatur. Das ist der Bewertungspunkt für die als zulässig betrachtete Temperaturveränderung.

Dieser Ansatz stellt eine starke Vereinfachung der limnophysikalischen Realität eines Sees dar.

Der Ansatz hat aus Sicht der Autoren im Wesentlichen folgende Einschränkungen:

1. In Seen findet permanent eine windgetriebene, dominant horizontale Strömung statt. Die Wasserverweilzeit im Bemessungsquader dürfte unter normalen Bedingungen im Bereich von Minuten liegen. Neben dem ständigen Wasseraustausch im Bemessungsquader verstärkt die Strömung zudem die transversale Dispersion des eingeleiteten Volumenstroms quer zur Strömungsrichtung. Dadurch passt sich die Temperatur des Strahls schneller der Seetemperatur an. Man kann den Ansatz der Bodenseerichtlinie (2018) als „Worst-case“ für den Fall von Windstille gelten lassen.
2. Die Bewertung nach der Bodenseerichtlinie (2018) betrachtet die Strahlausbreitung des eingeleiteten, thermisch genutzten Wassers, gestattet jedoch keine Rückschlüsse auf die Schichtung im See, wie die Stabilität und die Tiefenlage der Thermokline. Je größer die thermische Nutzung im Verhältnis zum Seevolumen ist, desto relevanter wird dieser Aspekt. Gerade die Entnahmetiefe und die Rückleittiefe sind wichtige Fragen der Genehmigungsbehörde.
3. Sofern in Anbetracht der natürlichen Temperaturschwankungen eines Sees eine (punktuelle) Temperaturveränderung von 1 K überhaupt gewässerökologisch von Relevanz ist, können bei bevorzugter und beabsichtigter Einleitung des thermisch genutzten Wassers ins Freiwasser Ausweichbewegungen der nicht sessilen Organismen angenommen werden.

4. Durch einfache technische Lösungen, wie z. B. einer Querschnittsaufweitung am Auslauf, einem Diffusor oder eine Prallwand hinter dem Auslauf, einer vertikalen Ausrichtung des Auslaufs nach unten oder oben usw., kann der Impuls des thermisch genutzten Wassers an der Einleitstelle signifikant verringert werden. Das führt bei gleicher thermischer Nutzung zu einer stark abweichenden Einschätzung des 1-K-Kriteriums am Rand des Bewertungsquaders.

Die Unteren Wasserbehörden (UWB) sind nach Einschätzung der Autoren aus den vorgenannten Gründen in der Genehmigungspraxis fachlich noch nicht in der Lage, Seethermie-Anlagen grundsätzlich zu bewerten, zumal es keine weiterführenden fachlichen Ausarbeitungen und Hilfestellungen zur Thematik, z. B. von der DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfälle e.V.), dem DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.) oder der LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser), gibt. Aus diesen Gründen werden von den Genehmigungsbehörden bevorzugt überhöhte Anforderungen an die beizubringenden Untersuchungen gestellt, die dann ohne limnophysische Modellierungen und ohne eine dezidierte gewässerökologische Bewertung nicht mehr auskommen.

Damit die Seethermie eine Chance im Zuge der Energiewende erhält, scheint es erforderlich, die wasserrechtliche Genehmigungspraxis zu vereinfachen. Dazu müssen der Genehmigungsbehörde geeignete Arbeitsmittel an die Hand gegeben werden.

7.3 Hilfestellungen zur Genehmigungsfähigkeit

In der Bodenseerichtlinie (IGKB 2014) bzw. im Internet werden frei verfügbare Berechnungsprogramme als Online-Anwendungen zur Ausbreitung eines Wasserstrahls in Standgewässern zur Bewertung thermischer Seewassernutzungen sowohl für den Wärme- als auch den Kältebetrieb angeboten.

Eine Anwendung stammt von der EAWAG (Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, (Eawag 2021)) aus der Schweiz und ein weiteres wurde von der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB 2021) entwickelt. Beide Anwendungen ermöglichen die Simulation der Ausbreitung einer thermischen Fahne in einem theoretischen Modellgewässer.

Beide Anwendungen eignen sich sehr gut zur Bestimmung der Ausbreitung einer thermischen Fahne in einem Gewässer mit einer vorgegebenen thermischen Schichtung. Damit können folglich Rückschlüsse auf die räumliche Ausdehnung des beeinflussten Bereiches im Gewässer getroffen werden. Des Weiteren können Aussagen über einen möglichen thermischen Kurzschluss zwischen der Entnahme- und der Einleitstelle getroffen werden. Die Anwendungen helfen, die Entnahme- und Einleithöhe für eine Wärmepumpe zu optimieren.

Die Eingangsdaten der Programme sind Folgende:

- ▶ Tiefe und Entfernung der Einleit- und Entnahmestelle,
- ▶ Volumenstrom der Wassereinleitung und Wasserentnahme,
- ▶ Durchmesser der Rohrleitungen für die Einleitung und Entnahme,

- ▶ Einströmwinkel der Einleitung,
- ▶ entzogene Wärme sowie
- ▶ Temperaturprofil des Gewässers.

Mit den angebotenen Anwendungen können nur Momentaufnahmen der Einmischung der thermischen Fahne einer Wärmepumpe in das Gewässer abgebildet werden. Hinsichtlich der zeitlichen Veränderlichkeit der thermischen Schichtung des Sees und der Variabilität des Wärmepumpenbetriebs sind die Berechnungen unflexibel.

In den Anwendungen werden keine windinduzierte Strömung und kein Strahlungseintrag durch die Sonne abgebildet. Die Temperaturschichtung wird durch die thermische Nutzung aufgrund der Berechnungsart nicht verändert. Der Sauerstoffhaushalt wird ebenfalls nicht betrachtet. Des Weiteren ist in den beiden Anwendungen entweder keine Morphometrie wie in den Anwendungen der IGKB oder nur eine stark abstrahierte Morphometrie (Böschungsneigung) wie in der Anwendung der Eawag vorgesehen. Die Morphometrie ist in der Anwendung der Eawag nicht modifizierbar. Sie liegt mit einer mittleren Böschungsneigung von etwa 1,0:1,7 zudem fernab üblicher morphometrischer Bedingungen von eiszeitlichen Binnenseen und Bergbaufolgeseen. Beide Anwendungen können damit nur eingeschränkte Aussagen zur gewässerökologischen Beeinflussung durch den Wärmepumpenbetrieb treffen.

Aus Sicht der Autoren sind die beiden verfügbaren Anwendungen der Eawag und des IGKB nur sehr eingeschränkt geeignet, den Behörden bei der Genehmigungsfähigkeit von Seethermie-Anlagen wie im vorliegenden Studienfall zu entscheiden.

7.4 Sichtweise der Behörden

Wie bereits ausgeführt, liegt für die mitteldeutschen Tagbaufolgeseen keine wasserrechtliche Genehmigungspraxis für die Beantragung von Seethermie-Projekten vor. Um bereits vor einer konkreten Beantragung eines Projekts eine Einschätzung zur Genehmigungsfähigkeit seitens der Behörden zu erhalten, wurden im Rahmen der Studie Behörden zu der Thematik befragt.

Auch wenn es nicht das erklärte Ziel der Studie war, ein Umsetzungsprojekt im Sinne der antragfähigen Planung für das Projektgebiet am Nordufer des Zwenkauer Sees vorlegen zu können, so konnten dennoch bereits detaillierte Angaben zum technischen System (Kap. 5) erarbeitet werden. Die Ergebnisse der Studie wurden in einer Projektbeschreibung zusammengefasst, um diese für Scoping-Gespräche mit den Behörden nutzen zu können.

Insgesamt wurden zehn Institutionen im Rahmen des Projekts zum Thema Seethermie angefragt. Zwei der Institutionen wurden konkret mit Bezug auf die Machbarkeitsstudie am Zwenkauer See kontaktiert:

1. Stadt Leipzig – Amt für Umweltschutz – Wasserbehörde
2. Landkreis Leipzig – Sachgebiet (SG) Wasser/Abwasser

Die parallele Ansprache der zwei Behörden ist damit zu begründen, dass mitten durch das Projektgebiet (Land- und Wasserfläche) am Nordufer des Zwenkauer Sees die Verwaltungsgrenze zwischen Stadt und Landkreis Leipzig verläuft. Je nach konkreter Festlegung der Einleit-/Entnahmestelle im Umsetzungsfall kann die Zuständigkeit in dem ein oder anderen Bereich liegen.

Von der Stadt Leipzig – Amt für Umweltschutz – Wasserbehörde, wird eine Rückmeldung für August 2021 erwartet. Die schriftliche Stellungnahme wird dem Auftraggeber durch die Autoren nach Vorliegen nachträglich übermittelt.

Zusammenfassung Stellungnahme Landkreis Leipzig (LKL 2021)

1. Naturschutzbehörde des Landratsamtes Landkreis Leipzig

„Zum Vorhaben kann nicht abschließend Stellung genommen werden.“

2. FB (Fachbereich) Gewässergüte Landratsamt Landkreis Leipzig

- a) *„Aus Sicht des FB (Fachbereich) Gewässergüte ist das Vorhaben grundsätzlich zustimmungsfähig. Eine abschließende Stellungnahme kann jedoch noch nicht erfolgen, da sich Nachforderungen ergeben. [...] Die Möglichkeit Seen als Wärmequellen zu nutzen ist grundsätzlich positiv zu bewerten, sofern dies ökologisch vertretbar ist und rechtliche Randbedingungen eingehalten werden. Da es zum Thema Wärmenutzung aus oberirdischen Gewässern einerseits keine konkrete rechtliche Regelung gibt und andererseits wenig Erfahrungswerte (in dieser Region sind die großen Seen erst in den letzten Jahren mit der Rekultivierung der Tagebaue entstanden), ist in jedem Fall eine Einzelfallprüfung erforderlich. Das o. g. Vorhaben erscheint zumindest grundsätzlich zustimmungsfähig.“*
- b) *„Grundsätzlich darf durch das geplante Vorhaben keine nachteilige Veränderung für die Lebens- und Fortpflanzungsbedingungen aquatischer Organismen entstehen. Ein möglicher Einfluss durch das Vorhaben auf aquatische Organismen muss in einem Gutachten untersucht werden. Die Oberflächengewässerverordnung (OGewV 2016) nennt den Parameter „Temperaturverhältnisse“ als eine allg. physikalisch-chemische Qualitätskomponente. Diese ist in jedem Falle bei der Beurteilung des Zustandes eines Wasserkörpers mitzubeachten. Ihr Einfluss auf die bewertungsrelevanten biologischen Qualitätskomponenten muss Gegenstand des o. g. Gutachtens sein. [...] „Zur Einordnung der gewässerökologischen Relevanz des Vorhabens ist den Antragsunterlagen ein Vergleich zu der Bodenseerichtlinie (IGKB 2005) zu entnehmen. Die Richtlinie steht unter dem Leitgedanken des ganzheitlichen Gewässerschutzes für den Bodensee und ist im Rahmen des geltenden Rechts anzuwenden. Somit ist sie als Orientierung für die Bewertung und Umsetzung des vorliegenden Vorhabens im Sinne der WRRL geeignet. Ungeachtet dessen müssen unbedingt die spezifischen Bedingungen des Zwenkauer Sees untersucht und für die Beurteilung gewässerökologischer Belange herangezogen werden. Insbesondere muss diesbezüglich die geplante Entnahme- und Einleittiefe in Bezug auf das Tiefenprofil und die Schichtung des Zwenkauer Sees geprüft werden. Gemäß Bodenseerichtlinie muss die max. Temperaturveränderung im Bereich der Einleitstelle außerhalb einer Mischungszone*



von 20 x 20 m horizontaler und 10 m vertikaler Ausdehnung unter 1 K bleiben. Es muss nachvollziehbar dargelegt werden, dass diese Vorgabe für das o. g. Vorhaben eingehalten wird.“

[...] „Eine detaillierte Abschätzung und Bewertung der gewässerökologischen Auswirkungen des Vorhabens (thermische Abkühlung) auf den Zwenkauer See ist vorzulegen. Inhaltliche Mindestanforderungen ergeben sich aus den o. g. Ausführungen. [...] Folgende biologische Qualitätskomponenten werden dann regelmäßig bewertet und haben Einfluss auf die Zustandsbewertung: Phytoplankton, Makrophyten/Phytobenthos, benthische wirbellose Fauna sowie die Fischfauna. Somit ist die Relevanz dieser Arten dargelegt, weshalb auch der Einfluss des beantragten Vorhabens auf diese Arten betrachtet werden muss“

Einschätzung zu b) aus Sicht der Arbeitsgruppe:

Die limnologischen Untersuchungen haben gezeigt, dass in mehr als 95 % des Jahres die Temperaturänderungen durch die Einleitung im genannten Umfang von abgekühltem Wasser in das Epilimnion weniger als 0,25 K betragen. Dies lässt sich als geringer Einfluss auf den Zustand des Wasserkörpers beschreiben. Auf die Plausibilität der Anwendung der ‚Bodenseerichtlinie‘ (IGKB 2018) für den Zwenkauer See, wird im Abschnitt 7.2 eingegangen.

- c) „Ein besonderes Augenmerk ist auf die Fischfauna zu legen, da diese als komplexe Organismen besonders sensibel gegenüber Temperaturveränderungen sind. Laut Anglerverband Leipzig e.V. sind durch die Flutung des Zwenkauer Sees mit Wasser der weißen Elster bereits viele Fische vorhanden, u. a. Schleie, Barsche, Karpfen, Hechte, Bitterlinge, Ukelei sowie verschiedene Weißfische. Im April 2018 erfolgte der offizielle Erstbesatz des Sees mit 1,2 Mio. Stück Brut der Fischart große Maräne. Seit Juni 2020 wird der See als allgemeines Angelgewässer geführt mit den Hauptfischarten Hecht und große Maräne.“ [...] „Seitens des FB Gewässergüte ergeben sich somit folgende Nachforderungen: [...] Angaben zum Schutz der Fischfauna an der Anlage der Wasserentnahme (gemäß § 26 Sächs-FischG).“
- d) Weiterhin sind durch den Fachbereich Gewässergüte Landratsamtes Landkreis Leipzig als Teil der Nachforderungen für eine konkrete Beantragung „Konkrete Angaben zum geplanten Anlagenbetrieb (kontinuierlich/diskontinuierlich/saisonal)“ zu machen.
- e) Folgender Hinweis zum späteren Betrieb wird zudem gegeben: „Biofouling in wasserführenden Anlagen (z. B. Kühlsystemen) ist ein verbreitetes Problem und erfordert (wenn kein Filter vorgeschaltet ist) mechanische/chemische Reinigungsverfahren. Ein Eintrag von Bioziden durch Antifouling-Mittel in den Zwenkauer See ist zu vermeiden.“
- f) In Bezug auf die projektbezogene Beantragung einer wasserrechtlichen Genehmigung nach § 26 Abs. 1 Sächsisches Wassergesetz (SächsWG) sowie für die wasserrechtliche Erlaubnis nach § 8 Abs. 1 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) sind konkrete Punkte genannt welche nachzuweisen zu beachten sind. Diese sind der Stellungnahme in der separaten Anlage zu entnehmen.

Weiterhin wurden acht Institutionen auf eher allgemeiner Ebene zum Thema Seethermie angesprochen. Zum Teil erfolgte dies schriftlich, zum Teil durch telefonische Kontaktaufnahme. Zu einigen Vertretern der Behörden bestanden bereits Kontakte, so dass eher informelle Einschätzungen aufgenommen werden konnten. Die Institutionen sind in den Ländern Sachsen, Thüringen und Brandenburg angesiedelt. Daraus ergibt sich ein größeres Bild, welches nicht nur die „sächsische Sicht“ auf die Thematik darstellt.

Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN 2021)

- a) Das TLUBN schätzt ein, *„dass eine Abkühlung im Allgemeinen geringere Folgen für das Ökosystem See hat als eine Erwärmung. Die saisonale Temperatur eines Gewässers variiert von Jahr zu Jahr. Sind die Temperaturänderungen durch die thermische Nutzung deutlich kleiner als diese natürlichen Schwankungen, sind kaum negative Auswirkungen für die Ökologie zu erwarten. Bei den geplanten Entnahmemengen vermuten wir, dass das Projekt hinsichtlich der Temperatureffekte für den gesamten [Zwenkauer] See zu keinen negativen Auswirkungen mit sich bringen dürfte“.*

„Es sollte jedoch so wenig wie möglich in das natürliche Schichtungsverhalten eingegriffen werden. Dieses ist insbesondere im Frühjahr relevant, wenn die Heizperiode noch nicht ganz abgeschlossen ist, aber das Seewasser bereits thermisch geschichtet ist. Die Einleitung des Eiswassers [...] sollte ins Hypolimnion erfolgen, die Entnahme hingegen aus dem Epilimnion. Die Einleitstelle sollte daher sehr viel tiefer als 3 m liegen. Im reinen Winterbetrieb kehren sich die Verhältnisse um. Die Durchmischung und damit Erwärmung des Flüssigeises hängt von seeinternen Strömungsverhältnissen und letztlich von Wettergeschehen (Wind/Sturm) ab. Im ungünstigen Fall ist das Seewasser stabil geschichtet und die Durchmischung ungünstig. Dann würde das „eiskalte Wasser“ zur Oberfläche aufsteigen. Insofern ist die höhenmäßige Anordnung von Entnahme und Wiedereinleitung je nach Temperaturverhältnissen im See ganz entscheidend.“

Einschätzung zu a) aus Sicht der Arbeitsgruppe:

Die limnologischen Untersuchungen haben gezeigt, dass in mehr als 95 % des Jahres die Temperaturänderungen durch die Einleitung von abgekühltem Wasser in das Epilimnion weniger als 0,25 K betragen. Daher ist von keiner flächigen Schichtungsänderung im Gewässer auszugehen. Eine Einleitung in das Hypolimnion ist daher, zumindest für das Projekt der Studie, als nicht notwendig anzusehen.

- b) Das TLUBN sieht weiterhin eine Orientierung an der *„in der Bodenseerichtlinie genannte Vorgabe einer Temperaturminderung um 1 K in einem gewissen Radius um die Einleitstelle [...] als sinnvolle Vorgabe“.* Explizit wird auch auf mögliche technische Probleme im Anlagenbetrieb bedingt durch ein saures Milieu („Versauerung“) hingewiesen. *„[...] Das Wasser des Zwenkauer Sees wird mit viel Aufwand gekalkt, um den pH-Wert von 7 annähernd zu halten. Ein langjähriger Korrosionsschutz für alle Anlagenteile wird vermutlich erforderlich sein.“*

Einschätzung zu b) aus Sicht der Arbeitsgruppe:

Materialien in Kontakt mit Seewasser werden korrosionshemmend ausgeführt (metallische Teile in der Anlage: Edelstahl, Aluminium). Festzuhalten ist, dass durch den Einsatz der Technologie zur Direktverdampfung der Kontakt von Anlagenteilen mit der flüssigen Phase (Wasser bzw. Wasser/Eis-Gemisch) deutlich reduziert wird und Korrosionsprobleme somit reduziert werden.

Neben den offiziellen Anfragen bei zuständigen Behörden führten Mitglieder des Konsortiums ebenfalls informelle Gespräche mit Vertretern der öffentlichen Institutionen. Die Anfragen wurden anfänglich an Untere Wasserbehörde (UWB), Obere Wasserbehörde (OWB) und Fachbehörden gerichtet. Dabei wurde deutlich, dass sowohl UWB als auch OWB zur Thematik nicht aussagefähig waren bzw. keine Aussagen treffen wollten. Die Anfragen wurden daher teilweise an die übergeordneten zuständigen Ministerien weitergeleitet. Dazu gehören: Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz Brandenburg (MLUK), Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Energie (MWAE) sowie Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft (SME-KUL).

Auf Ebene der OWB und UWB gab es zwei Rückläufer. Die wesentlichsten Aussagen lauten wie folgt:

- a) *„Die Prüfung Ihrer Anfrage zur Genehmigung von Wärmepumpen in Bergbaufolgeseen [...] kam zu dem Ergebnis, dass es sich dabei in der Regel um Gewässerbenutzungen (Entnahme bzw. Einleitung) handelt, die einer wasserrechtlichen Erlaubnis bedürfen. Die Zuständigkeit liegt bei der UWB. Die erforderlichen Antragsunterlagen sind je Einzelfall mit der UWB abzustimmen, spezielle Vorschriften gibt es dafür nicht. Dabei ist auch zu klären, ob es im Einzelfall weiterer Zulassungen nach Wasserhaushaltsgesetz bedarf.“*
- b) *„Eine [...] Abstimmung [...] kam zu dem Ergebnis, dass bislang zur Thematik noch keine weiterführenden fachlichen Ausarbeitungen vorliegen.“ „Es besteht [...] zur Gesamthematik noch erheblicher fachlicher Abstimmungsbedarf, um eine einheitliche Herangehensweise zu empfehlen, die auch behördenübergreifend getragen wird.“*
- c) *„Es ist [...] bislang davon auszugehen, dass belastbare Antworten zeitnah nicht verfügbar und mit dem Betreten von Neuland noch Wissenslücken zu schließen sind. Nach Aussage der Fachbehörde ist noch nicht klar, welche Volumina hier in Rede stehen, wie groß die Energieausbeute eingeschätzt wird und wie die Bilanz (Energieeinsatz vs. Energiegewinn) kurz-, mittel- und langfristig aussieht.“*

Die weiteren bisherigen Erkenntnisse aus den Behördenanfragen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- ▶ Es gibt noch keine Genehmigungspraxis zu Seethermie-Anlagen.
- ▶ Im Allgemeinen bestehen keine oder nur geringe Kenntnisse zu Seethermie-Anlagen.
- ▶ Die Bodensee-Richtlinie ist unter den Befragten überwiegend nicht bekannt.
- ▶ Da die Nutzungsziele der Seen eigentlich raumordnerisch festgelegt sind, wird es ein Raumordnungsverfahren (RoV) geben müssen.

- ▶ Eine UVP-Pflicht von Seethermie-Anlagen besteht nicht.
- ▶ Beizubringen sind jedoch Untersuchungen zu „Tiefe und Schichtungsverhalten, Wasserqualität, Ökologie und thermischem Regenerationsvermögen des Gewässers“. Über die fachliche Tiefe der Untersuchungen wird jedoch keine Aussage getroffen.
- ▶ Der wesentliche Fokus der Behörden ist die Gewässerökologie, die im Genehmigungsverfahren bewertet werden muss. OWB: *„Auch stellen sich zu den Umweltauswirkungen zahlreiche Fragen, die es noch zu prüfen gilt.“*

In der Wahrnehmung der Gesprächsführenden scheint die Offenheit gegenüber dem innovativen Thema der Seethermie in der Reihenfolge UWB → OWB → Fachbehörde → Ministerien zuzunehmen.

Die Erkenntnisse zum Thema ‚Genehmigungsfähigkeit‘ fassen die Autoren wie folgt zusammen:

- ▶ Die Seethermische Nutzung ist nach aktuellem Kenntnisstand und Einschätzung der Autoren grundsätzlich genehmigungsfähig. Die dafür erforderliche ökologische Unbedenklichkeit für das betrachtete Fallbeispiel Zwenkauer See wurde durch die Modellrechnung zur Limnologie festgestellt.
- ▶ Eine vorhabensspezifische Bewertung der Auswirkungen der Temperaturänderungen und veränderten Schichtungsverhältnisse auf Organismen im See wird Teil des Antrages zur Genehmigung sein. Die fachliche Tiefe ist mit den Behörden abzustimmen.
- ▶ Eine standardisierte Genehmigungspraxis sollte anhand eines oder mehrerer konkreter Projekte (z.B. in verschiedenen Bundesländern) mit den Behörden entwickelt werden.



8 Zusammenschau der Ergebnisse, deren Übertragbarkeit sowie Ausblick

8.1 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass Seethermie in Kombination mit der Vakuum-Flüssigeis-Technologie einen wichtigen Beitrag zum Versorgungsmix einer dekarbonisierten Wärmeversorgung leisten kann.

Unter den Bedingungen des exemplarischen Standortes kann die Technologie

- ▶ technologisch sinnvoll konfiguriert und eingesetzt,
- ▶ vergleichsweise wirtschaftlich betrieben,
- ▶ umweltverträglich gestaltet und
- ▶ von den zuständigen Behörden genehmigt werden.

Im Einzelnen kommen die Autoren in Antwort auf die Zielstellung zu folgendem Ergebnis:

- a) Der Zwenkauer See, seine räumlich-zeitliche Temperaturverteilung und deren Auswirkungen für die seethermische Nutzung

Der Zwenkauer See ist das Ergebnis der Flutung des ehemaligen Tagebaus Zwenkau, in dem der Abbau von Braunkohle im Jahr 1999 eingestellt wurde. Mit einer Fläche von aktuell 9,7 km² ist er das größte Gewässer im südlichen Leipziger Neuseenland. Die größten Ausdehnungen betragen von Ost nach West > 6,1 km und von Nord nach Süd knapp 4 km. Die maximale Tiefe beträgt 48 m, das Volumen des Wasserkörpers 0,176 km³. Der See verfügt über eine vergleichsweise geringe Dynamik; mit dem aktuellen Zufluss durch die Weiße Elster werden lediglich 6 % des Seeinhaltes jährlich bilanziell ausgetauscht. Die Sanierung des Bergbaufolgesees ist noch nicht abgeschlossen; der See untersteht noch dem Bergrecht.

Mit den zeitlich und räumlich hochauflösenden Temperaturmessungen (vgl. Kapitel 4) konnten sowohl der jahreszeitliche Gang der Gewässertemperatur als auch kurzzeitige Temperaturänderungen sehr gut erfasst werden. Die manuell aufgenommenen Temperaturprofile bestätigen die Messungen der automatischen Messbojen.

Unterhalb von 20 m Wassertiefe liegt die Wassertemperatur ganzjährig zwischen 2 und 9 °C, im oberflächennahen Bereich werden im Sommer bis 27 °C erreicht. Im Februar 2021 konnten die Auswirkungen eines vollständig zugefrorenen Sees auf die Temperaturschichtung aufgezeichnet werden. In 45 m Tiefe wurde eine Wärmezufuhr von der Gewässersohle belegt, die wahrscheinlich auf den Zutritt von wärmerem Grundwasser zurückzuführen ist.

Als wesentlicher Einflussfaktor für kurzzeitige Änderungen der vertikalen Temperaturverteilung konnte die Windstärke identifiziert werden. Sturmereignisse können innerhalb weniger Stunden durch Wellengang und Strömung zur vollständigen Durchmischung und damit zum Temperatúrausgleich bis in Tiefen von 20 m führen. Der Bereich von 20 m bis 45 m Tiefe weist dagegen, abgesehen vom jährlichen Temperaturgang, keine kurzzeitigen Temperaturschwankungen auf.

Da die laterale Temperaturverteilung im See sehr homogen ist, ergeben sich keine Einschränkungen bzw. Vorzugsbereiche für die Lage der Entnahme und Einleitstelle.

Die Höhe der Entnahmestelle in Bezug auf die Wasseroberfläche ist wesentlich von der gewünschten Entnahmetemperatur abhängig. Sollen kurzfristige Schwankungen der Rohwassertemperatur vermieden werden, bietet sich die Entnahme unterhalb einer Wassertiefe von 20 m an. Der Bereich oberhalb von 20 m Wassertiefe hat dagegen den Vorteil eines höheren Temperaturniveaus während der Sommerstagnation.

Die Tiefe der Einleitstelle ist von der Temperatur des einzuleitenden Wassers und von der beabsichtigten Wirkung auf die Temperaturschichtung abhängig. Durch Einleitung in die der Temperatur des Einleitwassers entsprechende Gewässerschicht können Dichtebedingte Zirkulationen reduziert werden. Ist eine verstärkte Vertikalströmung gewünscht, ist eine möglichst hohe Differenz zwischen der Temperatur des Einleitwassers und der Gewässertemperatur an der Einleitstelle zu wählen.

b) Gewässerökologische Bewertung

Voraussetzung für die thermische Nutzung von Gewässern ist die ökologische Unbedenklichkeit. Durch den Einsatz der Vakuum-Flüssigeis-Technologie werden die physikalischen Eigenschaften des genutzten Wassers hinsichtlich der Temperatur und der Sauerstoffkonzentration verändert. Entsprechend wissenschaftlicher Erkenntnisse und darauf basierender gesetzlicher Vorgaben ist bei Temperaturveränderungen von weniger als 1 K und bei Gewährleistung einer Mindestsauerstoffkonzentration von 6 mg/l nicht von nachteiligen Auswirkungen auf die Lebensgemeinschaften in Gewässern auszugehen.

Durch limnophysikalische Modellierungen konnte für verschiedene Bereiche in unterschiedlicher Entfernung von der Rückleitstelle des zur Wärmegewinnung entnommenen Wassers nachgewiesen werden, dass es durch einen Wärmepumpenbetrieb in der vorgesehenen Dimensionierung im Zwenkauer See zu keiner Zeit zu einer Temperaturveränderung von 1 K oder darüber kommt. In über 95 % des Jahresverlaufs liegen die maximalen lokalen Temperaturveränderungen unter 0,25 K. Die Verminderungen der Sauerstoffkonzentrationen erreichen im Einleitungsbereich temporär und lokal maximal 0,6 mg/l. Aufgrund der stets hohen Sauerstoffkonzentrationen im Bereich der Einleitstelle wird eine als kritisch anzusehende Sauerstoffkonzentration zu keiner Zeit annähernd erreicht.

Aus dem prognostizierten Wärmepumpenbetrieb lassen sich entsprechend keine nachteiligen Veränderungen auf die Gewässerökologie hinsichtlich des natürlichen Schichtungsverhaltens und des Sauerstoffhaushalts des Zwenkauer Sees ableiten. Die Veränderungen der Lebensbedingungen für die Organismen im See sind minimal und als ökologisch nicht relevant anzusehen.

c) Abgeleitetes technisches Konzept und Wirtschaftlichkeit

Es wurde ein technisches Konzept entworfen, das einen zentralen Standort für den Vakuum-Flüssigeis-Erzeuger, eine Verteilung der Wärme mittels „kaltem Netz“ in die einzelnen Dörfer und je eine Wärmepumpe je Dorf, also in räumlicher Nähe zu den größten Wärmeverbrauchern vorsieht. Damit wird der verteilten Anordnung der Siedlungen (Dörfer), der Größenordnung des Gesamt-Wärmebedarfes sowie der festgelegten Seewasserentnahme und -einleitstelle Rechnung getragen.

Dem Wasserkörper wird ufernah und in geringer Tiefe Wasser entnommen und der VFA zugeführt.

Wesentliche Parameter für die Einleitstelle sind:

- ▶ Entnahmemenge: \varnothing ca. 288 m³/d
(entspricht 0,00017 % des Seevolumens)
- ▶ Entnahmetemperatur: 3 – 23 °C (je nach jahreszeitlicher Schwankung)
- ▶ Einleittemperatur: 0 – 20 °C
- ▶ ΔT Entnahme/Einleitung: 0 – 3 K

In der Vakuum-Flüssigeis-Anlage erfolgt eine Direktverdampfung, bei der das Seewasser gleichzeitig als Kältemittel dient. Der Wasserdampf ist Träger der dem Seewasser entzogenen Wärme. Er wird vom Verdichter auf ein höheres Druckniveau komprimiert und gibt auf einem höheren Temperaturniveau bis maximal ca. 20 °C die Wärme an die nachgelagerten Wärmepumpen über das sogenannte „kalte Netz“ ab. Die Rohrleitungen dieses Netzes kommen, wegen der geringen Vorlauftemperaturen, vollständig ohne Isolierungen aus.

Die Wärmepumpen in den Dörfern stellen ein Temperaturniveau von bis zu 50 °C zur Verfügung, mit dem die Gebäude über nachgeschaltete Nahwärmenetze mit isolierten Rohrleitungen beheizt werden. Die Trinkwassererwärmung erfolgt dezentral über integrierte Trinkwasser-Module in den Hausübergabestationen.

Für das technische Grobkonzept wurden Gesamtinvestitionskosten von 2,8 Mio. € abgeschätzt. Als erster grober Richtwert für die Wirtschaftlichkeit des Gesamtkonzeptes wurde ein Wärme-Mischpreis von:

- ▶ 16,75 €/ct/kWh ohne Förderung, und
- ▶ 13,69 €/ct/kWh mit 30 % Investitionsförderung berechnet.

Im Preisvergleich mit ausgewählten alternativen Versorgungsvarianten im Mehrfamilienhaus-Neubau zeigte sich, dass das Konzept vergleichbare und geringere Versorgungskosten liefert, wie sie beispielsweise mit Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Photovoltaik und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung zu erwarten wären.

Die CO₂-Bilanz liegt im Vergleich am Mehrfamilienhaus-Neubau in derselben Größenordnung wie ein Holz-Pelletkessel.

Im Zuge der Konkretisierung der Projektplanungen sollte eine integrierte Betrachtung des Gebäudeenergiestandards mit einem Variantenvergleich der Wärmeversorgung erfolgen. Dabei können sich die Kosten der Wärmeversorgung noch ändern.

d) Genehmigungsfähigkeit

Die Autoren schätzen ein, dass das technologische Konzept hinsichtlich der eingesetzten Stoffe und möglicher Emissionen so gestaltet werden kann, dass es aus wasser- und immissionsschutzrechtlicher Sicht sicher und grundsätzlich genehmigungsfähig ist. Dies betrifft alle Fragen hinsichtlich eingesetzter Kühl- und Schmiermittel sowie weiterer Betriebs- und Betriebshilfsstoffe bis hin zum Thema Lärmemissionen. Hier gelten keine anderen Bedingungen als bei vergleichbaren technischen Anlagen (z.B. Luft-Luft-Wärmepumpen). Es sind bezüglich dieser Sachverhalte keine Behördenauflagen zu antizipieren, die einer Installation und dem Betrieb einer solchen Anlage grundsätzlich- oder erschwerend entgegenstehen. Auch ein Entnahmebauwerk sollte nach weiterer Stabilisierung der Ufer und subaquatischen Böschungen am exemplarischen Standort in naher Zukunft genehmigungsfähig sein.

Gesondert diskutiert werden müssen die Fragen der Wasserentnahme und der Wiedereinleitung von Wasser – hier mit einer niedrigeren Temperatur –, die in der Studie ausführlich behandelt wurden. Für den Tagebaurestsee muss das Bundes-Berggesetz als maßgeblicher Rahmen angeführt werden, das über dem Wasserrecht steht und die Sanierung der Bergbaufolgelandschaft (inkl. der Gewässer) zum Inhalt hat, bis diese in den Rechtsrahmen außerhalb der Berggesetzgebung überführt werden kann. Eingriffe müssen unbedenklich sein und dem o.g. Ziel unterliegen bzw. dürfen diesem nicht entgegenstehen.

Zielstellung bzgl. des Gewässers ist die Einhaltung der Wasserrahmen-Richtlinie der EU (EG-WRRL 2000) Eingriffe gelten als unbedenklich, wenn sie keine ökologischen Veränderungen in Form von Änderungen biozönotischer Strukturen (Artenzusammensetzung, Biomasse, Dominanzstrukturen) bei den biologischen Qualitätskomponenten gemäß EG-WRRL enthalten. Mit dem ‚Verschlechterungsverbot‘ wäre zudem keine signifikante Erwärmung des Gewässerkörpers zulässig. Durch eine Kombinationsanlage mit größerer Wärmeentnahme im Vergleich zum Wärmeeintrag könnte das ‚Verschlechterungsverbot‘ eingehalten werden. Die Vakuum-Flüssigeis-Technologie bewirkt dann eher eine geringfügige Abkühlung des Wassers. Hier könnte im Rahmen des Genehmigungsverfahrens ggf. gefordert werden, dass mögliche ökologische Veränderungen durch die Abkühlung zu bewerten sind. Eine UVP ist im Ergebnis der Behörden-Scoping nach jetzigem Rechtsstand nicht erforderlich. Die Seethermie-Anlage wäre im Rahmen eines wasserrechtlichen Erlaubnisverfahrens zu genehmigen.

Die Anwendung der ‚Bodenseerichtlinie‘ (IGKB 2018), in der als Ort der Bewertung die geometrische Form eines Quaders festgelegt wurde, innerhalb deren eine Abkühlung bis zu einer Temperaturdifferenz von 1 K zulässig ist, erscheint den Autoren nicht auf die Situation in den Tagebaurestseen anwendbar.

Es wird eher notwendig sein, eigene regionale Bewertungen zu entwickeln, die der Situation in den mitteldeutschen (und Lausitzer) Bergbaufolgelandschaften gerecht wird (s. Kapitel 8.2).

8.2 Übertragbarkeit

Die beabsichtigte Errichtung eines Hotelkomplexes am Ufer des Zwenkauer Sees bot einen günstigen Anlass für eine exemplarische Betrachtung dieser alternativen erneuerbaren Wärmeversorgung in der Skalierung eines Quartiers.

Anhand der Ergebnisse in Kapitel 8.1 werden hier die Übertragbarkeit auf andere Nutzungen und Seen diskutiert und Hinweise gegeben, welche wesentlichen technischen, ökologischen, limnologischen und rechtlichen Bedingungen bei der thermischen Nutzung von Bergbaufolgeseen im Allgemeinen zu beachten sind.

Die Ergebnisse der Studie sollen Gemeinden, Investoren, Forschungseinrichtungen und Genehmigungsbehörden an vergleichbaren Standorten als Basis dienen, um Projekte zur thermischen Seewassernutzung an Tagebaurestseen bzw. künftig auch weiteren Gewässern zu initiieren. In Kapitel 8.3 wird hierfür eine Checkliste zur Verfügung gestellt.

Gegenwärtig existiert noch keine Genehmigungspraxis für seethermische Nutzungen im Speziellen in Bezug auf Tagebaurestseen wie dem Zwenkauer See. Für die zuständigen Behörden stehen noch keine Handlungsanleitungen und deshalb keine verbindlichen Bewertungsmaßstäbe zur Verfügung. Ein vereinfachter, orientierender Ansatz besteht aus Sicht der Autoren darin, die installierte thermische Leistung der Wärmepumpenanlage ins Verhältnis zur thermischen Leistung des Gewässers oder, besser noch, die zur Nutzung vorgesehene thermische Arbeit ins Verhältnis zur thermischen Arbeit des Gewässers zu setzen. Der Schwellenwert, ab wann gewässerökologisch nachteilige Entwicklungen zu befürchten wären, ist grundsätzlich für jeden See individuell durch systematische, limnophysikalische Modellierungen herauszuarbeiten. Der bilanzierende Ansatz versetzt die Genehmigungsbehörden in die Lage, mehrere und unterschiedliche Nutzungen (auch zur Kühlung) zu bewerten und zu gestatten.

Im konkreten Fall des exemplarischen Standortes hat die seethermische Nutzung einen Anteil von < 0,02 % der Wärmearbeit des Zwenkauer Sees (Tabelle 18).

Tabelle 18: Bilanz der thermischen Arbeit der Wärmepumpenanlage und des Zwenkauer Sees.

| Kennwert | Wert | Einheit |
|---|-----------|-------------------------|
| Fläche des Zwenkauer Sees | 9.700.000 | m ² |
| Mittlere jährliche Globalstrahlung 1991-2020 in Mitteldeutschland (DWD) | 1.090 | kWh/(m ² ·a) |
| Mittlerer Albedo über Wasserflächen | 0,1 | - |
| Geplanter Wärmebedarf des Quartiers (Abschnitt 3.4) | 1.500 | MWh/a |
| Energieeintrag in den Zwenkauer See | 9.515.700 | MWh/a |
| Anteil des Wärmebedarfs des Quartiers am gesamten Wärmeeintrag in den Zwenkauer See | 0,0158 % | |

Die Autoren empfehlen die Entwicklung eines sogenannten Seethermie-Nutzbarkeitsindex SN_{ix} :

Mit dem Seethermie-Nutzbarkeitsindex SN_{ix} lässt sich die Schwelle abschätzen, bis zu der die Auswirkungen der Summe der thermischen Nutzungen zu keiner nachweisbaren Beeinträchtigung des gewässerökologischen Zustands führen und somit eine Genehmigungsfähigkeit im Rahmen objektspezifischer Festlegungen der Rahmenbedingungen seethermischer Nutzungen gegeben sein sollte. Er wird aus dem Quotienten der thermischen Leistung bzw. Arbeit aller installierter und geplanter Wärmepumpen und der des Gewässers gebildet.

Mit der Bilanz der Wärmearbeit ist jedoch noch keine Aussage zu den gewässerökologischen Auswirkungen getroffen. Grundsätzlich ist jeder See, ob natürlicher eiszeitlicher See oder Bergbaufolgesee, ein Individuum hinsichtlich seiner Morphometrie, seines Schichtungsverhaltens, seines Stoffhaushaltes und seiner Biozönosen. Für die Lösung dieser Aufgaben helfen die Erfahrungen aus dieser Studie.

8.3 CHECKLISTE

für die Entscheidungsfindung und Vorbereitung einer Seethermie-Nutzung in Tagebaurestseen unter Verwendung der Vakuum-Flüssigeis-Technologie

Nachfolgend legen die Autoren eine Checkliste vor, die künftigen Nutzer:innen der Seethermie Handreichung für die Schritte auf dem Wege bis zur Umsetzung gibt. Sie beschränkt sich auf den Teil ‚Seethermie‘ eines möglicherweise komplexeren Bauvorhabens (Neubau / Sanierung, Netz usw. ...). Dazu gehören:

1. überschlägige Ermittlung des Gesamtwärmebedarfs
2. Verfügbarkeit / Potenziale von Seethermie (= Gewässernähe und -größe, überschlägig)
3. Ausschlusskriterien / Raumwiderstände (Schutzzonen, Raumplanung, ...)
4. Möglichkeiten der Förderung einer Machbarkeitsstudie, ggf. deren Beantragung
5. Machbarkeitsstudie mit
 - a) Jahresgang und räumlicher Verteilung von Heizlast / Nutzenergiebedarf
 - b) limnologische Beschreibung des Gewässers und dessen Vulnerabilität/Resilienz gegenüber thermischen Nutzungen
 - c) Ermittlung des Seethermie-Nutzbarkeitsindex SN_{ix} (sobald dieser verfügbar ist)
 - d) Lage und Höhe der Entnahme- und Einleitstelle
 - e) technisches Konzept mit Vakuum-Flüssigeis-Anlage und Nahwärmenetz(en)

- f) Kosten / Wirtschaftlichkeit / Sensitivität
 - g) Optionen von Förderung(en)
 - h) Antizipierung des Behördenermessens / Voranfrage
6. Beantragung der wasserrechtlichen Genehmigung und wasserrechtlichen Erlaubnis
 7. Förderbeantragung (ggf. bereits gleichzeitig mit Punkt 5 oder 6)
 8. Erfüllung von Behördenauflagen, ggf. mit Durchführung einer Messkampagne
 9. Eingang der wasserrechtlichen Genehmigung / Erlaubnis
 10. Projektplanung gem. den Inhalten der Leistungsphasen 1-9 der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI)

8.4 Ausblick

Die jüngst (06/2021) beschlossene Novellierung des Klimaschutzgesetzes (BMU 2021) durch die Bundesregierung mit den noch anspruchsvolleren Emissionsreduktionszielen der Treibhausgasneutralität bis 2045 und der Qualifizierung der Zwischenziele für 2030 und 2040 bedeutet eine weitere Forcierung der Abkehr von fossiler Wärme und führt zur Beschleunigung der Entwicklung alternativer Energiesysteme und der verstärkten Nutzung lokaler Potenziale.

Die lokaltypischen Potenziale der Leipziger Neuseenlandschaft können bei der energetischen Transition eine gewichtige Rolle spielen, wenn es gelingt, die Ergebnisse dieser Seethermie-Studie in einen Roll-Out zu überführen und dafür alle relevanten Stakeholder zu aktivieren.

Aus diesem Grund ist geboten, mit kürzeren Fristen als in Deutschland gewohnt eine bereits ausgezeichnete technologische Innovation⁷ und eine nachgewiesene Umsetzungsmethode in die Praxis zu überführen. Da die Grundmechanismen mit dieser Studie geklärt wurden, muss mit der Anwendung als ein Baustein bei der Dekarbonisierung nicht auf die Schließung aller Wissenslücken bis in das letzte Detail gewartet werden⁸.

Für einen solchen transdisziplinären Ansatz wird von den Autoren folgende Vorgehensweise empfohlen:

I. Positive Kommunikation der Ergebnisse

⁷ Die vom ILK Dresden entwickelte Vakuum-Flüssigeis-Technologie wurde im Jahr 2020 mit dem *eku* - ZUKUNFTSPREIS des Sächsische Staatsministeriums für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft (SMEKUL) ausgezeichnet.

Preisträgervideo: www.youtube.com/watch?v=3cO8bX3c144

⁸ Die Zeiträume für FuE-Anträge z.B. bei BMBF oder BMWi, deren Bearbeitung, Bewilligung, Projektdurchführung sowie die anschließende Überführung eines Piloten oder Demonstrators bis zur Marktreife sind viel zu lang, in diesem Fall deutlich größer als 5 Jahre.

Aus der Erfahrung weniger gelungener Kommunikationen bei Technologien anderer Energieträger sollte die Seethermie kommuniziert werden als das, was sie ist:

Ein enormes, umweltfreundliches, energetisches Potenzial, das mit Hilfe der in Mitteldeutschland ansässigen Ingenieurskompetenz und der an der Transformation beteiligten Strukturen als Chance für einen erfolgreichen Strukturwandel genutzt wird.

Hierbei sind gerade die ersten Schritte wichtig, um dieses Potenzial nicht durch Bedenken bereits in der Anfangsphase in Misskredit bringen zu lassen. Dafür sollte eine Kommunikationsstrategie erarbeitet und gezielte Öffentlichkeitsarbeit betrieben werden.

II. Installation und Betrieb eines Piloten

Sowohl die Vakuum-Flüssigeis-Anlage als auch deren Anwendung für die seethermische Nutzung ist eine grundsätzlich anwendungsreife Technologie. Die Errichtung eines Piloten hilft Restfragen, z.B. bei der Fahrweise, zu klären, die Wirtschaftlichkeit an der existierenden Anlage nachzuweisen, öffentliches Interesse zu wecken sowie Investoren und Multiplikatoren einzuwerben.

Wann es zum Bau des Quartiers ‚Neue Harth‘ kommt, ist noch terminlich unbestimmt und kann geraume Zeit in Anspruch nehmen. Wir empfehlen dringend eine zeitnahe Akquise eines geeigneten Standortes, die Gewinnung interessierter öffentlicher oder privater Investoren und die Eröffnung idealer Fördermöglichkeiten.

Eine auf diese Pilotanlage ausgerichtete Vorplanung sollte frühzeitig die zuständigen Behörden einbeziehen, um auch von vornherein auf schlanke Verfahrenswege, insbesondere bei dem wasserrechtlichen Genehmigungs- und Erlaubnisverfahren, einwirken zu können.

Die Erkenntnisse aus der Kurzzeitdemonstration der Vakuum-Flüssigeis-Technologie zur Wärmeabgewinnung an einem Fließgewässer in Zittau (03/2021 begonnenes Verbundprojekt AQVA HEAT I (ILK / HS Zittau-Görlitz / BTU Cottbus-Senftenberg) können hierbei genutzt werden.

III. Gezielte transdisziplinäre Forschung und Entwicklung

Zeitnah sollten mit den Forschungsinstitutionen der Region (HTWK Leipzig, Uni Leipzig, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig...) und den Treibern der Energiewende, wie der Innovationsregion Mitteldeutschland, als Strukturwandelprojekt der Europäischen Metropolregion Mitteldeutschland, dem Neu e.V. und weiteren Partnern umsetzungsorientierte Forschungsfragen für die Seethermie detektiert werden.

Im Falle einer Vorhabensbewilligung könnten diese Forschungsfragen noch im Jahr 2021 in die Planung des WIR!-Projektes RegioZukunft:Wärme (NEU e. V., HTWK Leipzig und UFZ als initiiierende Partner im Innovationscluster für die Region Borna-Leipzig-Bitterfeld) implementiert werden. Erfolgt keine Bewilligung von RegioZukunft:Wärme durch

das BMBF, sind andere Möglichkeiten, wie beispielsweise das gerade im Aufbau befindliche mitteldeutsche ZIM-Netzwerk URMIT (Umweltwärme für Mitteldeutschland) oder andere zu nutzen.

Die Autoren regen im Rahmen dieser Forschungsarbeiten u.a. die Entwicklung eines eigenständigen Tools für die Bewertung ökologischer Veränderungen in den mitteldeutschen und Lausitzer Tagebaurestseen hinsichtlich der biologischen Qualitätskomponenten gemäß EG-WRRL an.

Synergien bei der Forschungstätigkeit entstünden mit dem Piloten (II.), der für ein wissenschaftliches Monitoring genutzt werden könnte.

Zusatz:

In diesem Kapitel ‚Ausblick‘ möchten die Autoren abschließend den Blick auf die Studie **aquistore** nicht versäumen. **aquistore** („Adaption von Technologien saisonaler geogener Wärmespeicher auf die Aquifere der Innovationsregion“) befasst sich ebenso wie dieses Seethermie-Projekt im Auftrag der Innovationsregion Mitteldeutschland mit der Erschließung besonders ausgeprägter Geopotenziale der Region für die grüne Wärmewende. Das Projekt wird Ende 2021 abgeschlossen werden. Erste Ergebnisse deuten bereits jetzt auf ähnlich positive Ergebnisse hin – hier im Hinblick auf die Nutzbarkeit von tertiären und quartären Grundwasserleitern für die Einspeicherung von Wärme und Kälte.

Die regionalen Geopotenziale ‚Tagebaurestseen‘ für die Seethermie und die Aquifere des sogenannten Weißelsterbeckens sind herausragende Inhalte und Gedankenanstoß zur Etablierung eines Kompetenzzentrums in der Region.

Mit diesen Potenzialen steht die Region deutschlandweit einmalig da und kann die zusammenzuführende Expertise ihrer Ingenieure und Wissenschaftler nicht nur als Beitrag zur originären Lösung ihres eigenen Strukturwandels, sondern mit Hilfe eines solchen Kompetenzzentrums auch zum Export von Know-how nutzen.

Die Europäische Metropolregion Mitteldeutschland kann im Rahmen des Strukturwandelprojektes „Innovationsregion Mitteldeutschland“ als Treiber der Energiewende hier eine Schlüsselfunktion einnehmen. Neben den wirtschaftlichen Effekten hat die Entwicklung zukunftsfähiger energetischer Wertschöpfung, die an gleicher Stelle die fossile Energieerzeugung ablöst bzw. sich bei den Tagebaurestseen der Wunden früherer extensiver Wertschöpfung auf umweltfreundliche Weise bedient, symbolische Strahlkraft.



Literaturverzeichnis

Literaturverzeichnis

- Baur, Werner H.; Rapp, Jörg (2002): *Gesunde Fische. Praktische Anleitung zum Vorbeugen, Erkennen und Behandeln von Fischkrankheiten*. 2., neubearb. Aufl. Berlin: Parey.
- BbgWG (2017): *Brandenburgisches Wassergesetz*. BbgWG, vom 04.12.2017. Fundstelle: Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg 28. Online verfügbar unter https://bravors.brandenburg.de/br2/sixcms/media.php/76/GVBl_I_28_2017.pdf.
- BDEW (2018): *Standardlastprofile Gas*. Online verfügbar unter <https://www.bdew.de/energie/standardlastprofile-gas/>, zuletzt geprüft am 20.02.2021.
- BDEW; VKU; GEODE (2018): *BDEW/VKU/GEODE- Leitfaden Abwicklung von Standardlastprofilen Gas*. Hg. v. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V., Verband kommunaler Unternehmen e. V. und Groupement Européen des entreprises et Organismes de Distribution d'Énergie. Berlin. Online verfügbar unter https://www.vku.de/fileadmin/user_upload/Verbandsseite/Sparten/Energiewirtschaft/Gasthemen/nach_Leitfaden_SLP.pdf, zuletzt geprüft am 20.02.2021.
- BMI (2020): *Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechtes für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze, Anlage 10 (zu §86)*. GEG. Fundstelle: Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, S. 1790. Online verfügbar unter https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/text.xav?SID=&tf=xaver.component.Text_0&toctf=&qmf=&hlf=xaver.component.Hitlist_0&bk=bgbl&start=%2F%2F%5B%40node_id%3D%27817897%27%5D&skin=pdf&tlevel=-2&nohist=1.
- BMU (2009): *Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushaltes - Wasserhaushaltsgesetz*. WHG, vom 2020. Fundstelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
- BMU (2014-2021): *Gewässerbewertung gemäß WRRL*. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Online verfügbar unter www.gewaesser-bewertung.de, zuletzt geprüft am 2021.
- BMU (2016): *Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer, OGeWV*, vom 15.06.2020. Fundstelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. In: BGBl. I S. 1373.
- BMU (2021): *Geszentwurf der Bundesregierung, Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes*, vom 11.05.2021. Fundstelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
- Cole, T. M.; Wells, S. A. (2021): *CE-QUAL-W2: A Two-dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 4.2. User Manual*. Hg. v. University of Portland. Portland.
- Czegka, Wolfgang; Junge, Frank W.; Hausmann, Jörg; Kuchenbuch, Veit; Wennrich, Rainer (2008): *Hydrochemical und geochemical parameters of new developing lakes*

- of the Neuseenland (New Central German lake district) an overview. In: *zdg* 159 (1), S. 141–154. DOI: 10.1127/1860-1804/2008/0159-0141.
- DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Bonn: Wirtschafts- und Verl.-Ges. Gas und Wasser mbH (DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 238).
- Eawag (2021): Thermische Einleitung in einem See. Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz. Online verfügbar unter <https://thermdis.eawag.ch/de/model>.
- EG-WRRL (2000): Richtlinie 2000/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates der europäischen Union vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmes für Maßnahmen der gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. RL 2000/60/EG, vom 23.10.2000. Fundstelle: Europäisches Parlament; Rat der europäischen Union.
- Fink, Gabriel; Schmid, Martin; Wüest, Alfred (2014): Large lakes as sources and sinks of anthropogenic heat: Capacities and limits. In: *Water Resour. Res.* 50 (9), S. 7285–7301. DOI: 10.1002/2014WR015509.
- FRANK GmbH (2012): Limnion Lima-1. Prospekt in Niederländisch. Online verfügbar unter https://www.frank-gmbh.de/de-wAssets/docs/download/download-niederlaendisch/geothermie_haustechnik/prospekt_lima1_mail_niederlaendisch.pdf.
- Gaudard, Adrien; Schmid, Martin; Wüest, Alfred (2017): Thermische Nutzung von Oberflächengewässern. Mögliche physikalische und ökologische Auswirkungen der Wärme- und Kältenutzung. In: *Aqua & Gas* (5), S. 40–45.
- Gaudard, Adrien; Schmid, Martin; Wüest, Alfred (2018a): Thermische Nutzung von Seen und Flüssen. In: *Aqua & Gas* (2).
- Gaudard, Adrien; Weber, Christine; Alexander, Timothy J.; Hunziker, Stefan; Schmid, Martin (2018b): Impacts of using lakes and rivers for extraction and disposal of heat. In: *WIREs Water* 5 (5), e1295. DOI: 10.1002/wat2.1295.
- Hupfer, Michael; Calmano, Wolfgang; Klapper, Helmut; Wilken, Rolf-Dieter (Hg.) (1995): Handbuch angewandte Limnologie. Grundlagen, Gewässerbelastung, Restaurierung, aquatische Ökotoxikologie, Bewertung, Gewässerschutz. Landsberg am Lech, Weinheim: ecomed; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- IBGW (2019): Präzisierung des Hydrogeologischen Großraummodells Süd HGMS2017. Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH. Leipzig.
- IBGW (2021): Hydrodynamischer Jahresbericht 2019 - Modellabgleich zur hydrodynamischen Situation 2019 für den Südraum von Leipzig. Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH. Leipzig.
- IGKB (2014): Bodensee-Richtlinien 2005. (mit Änderung des Kapitel 5 vom 13.05.2014). 2. Aufl. Hg. v. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB).
- IGKB (2018): Bodensee-Richtlinien 2005 (mit Änderung des Kapitels 5 vom 13.05.2014 und des Kapitels 6 vom 09.05.2018). IGKB, vom 09.05.2018. Fundstelle: Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee.
- IGKB (2021): Thermische Nutzungen - Ein Bemessungswerkzeug der IGKB. IGKB. Fundstelle: Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee. Online verfügbar unter https://www.h2o-online.com/igkb_therm/igkb_therm_jet.php. Abgerufen am: 25.05.2021.

- ITG (2021): BDEW-Heizkostenvergleich Neubau 2021. Ein Vergleich der Gesamtkosten verschiedener Systeme zur Heizung und Warmwasserbereitung in Neubauten. Autoren: ITG Institut für Technischen Gebäudeausrüstung Dresden Forschung und Anwendung GmbH. Online verfügbar unter <https://www.bdew.de/energie/der-bdew-heizkostenvergleich/>.
- Kammer, Henriette (2018): Thermische Seewassernutzung in Deutschland. Bestandsanalyse, Potential und Hemmnisse Seewasserbetriebener Wärmepumpen. Wiesbaden: Vieweg. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5231557>.
- Kammer, Henriette; Rothstein, Benno; Baumhauer, Roland (2015): Seewasserbetriebene Wärmepumpen in Deutschland – ungenutzte Potentiale und Hemmnisse einer sinnvollen Nutzung.
- labor 4+: Masterplan neue Harth 2015. Unter Mitarbeit von J. Adolph, D. Hamann, F. Alles und F. Schieferdecker.
- Landratsamt Landkreis Leipzig (2020): Wasserrechtliche Genehmigung nach §26 Sächsischen Wassergesetz (SächsWG) zum Einbringen von 3 Temperaturmessbojen in den Zwenkauer See. Unter Mitarbeit von S. Zenker, 28.09.2020.
- LfULG (2013): Sächsisches Wassergesetz. SächsWG. Fundstelle: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- LfULG (2021): Datenplattform iDA. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen. Online verfügbar unter <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/infosysteme/ida/pages/map/default>.
- LMBV mbH (2020): Gestattungsvertrag zur Inanspruchnahme dreier Grundstücke für die Errichtung und den Betrieb von temporären Temperaturmessbojen am Standort Zwenkauer See. Vertrag zwischen Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH und JENA-GEOS-Ingenieurbüro GmbH, 07.10.2020.
- LMBV mbH (2021a): Flutungsstand Südraum Leipzig, Stand März 2021. Online verfügbar unter <https://www.lmbv.de/index.php/suedraum-leipzig.html>.
- LMBV mbH (2021b): Wasserwirtschaftlicher Jahresbericht 2020. Wasserwirtschaftlicher Jahresbericht der LMBV mbH für den Zeitraum 01. Januar - 31. Dezember 2020. Senftenberg.
- Max Loidl (2009): Übersicht maxloidlverfahren in stehenden Gewässern. Hg. v. Max Loidl. Online verfügbar unter <http://www.maxloidlverfahren.de/verfahren-mit-schutzrohr/>.
- Mischke, U.; Riedmüller, U.; Hoehn, E.; Deneke, R.; Nixdorf, B. (2015): Handbuch für die Seebewertung mittels Plankton – Phyto-See-Index (Teil A) und PhytoLoss-Modul Zooplankton (Teil B), S. 1–143.
- Nützmann, Gunnar; Moser, Hans (2016): Elemente einer analytischen Hydrologie. Prozesse – Wechselwirkungen – Modelle. Wiesbaden: Springer Spektrum (Lehrbuch).
- Riedmüller, U.; Mischke, U.; Pottgiesser, T.; Böhmer, J.; Deneke, R.; Ritterbusch, D. et al. (2013): Steckbriefe der deutschen Seetypen. Begleittext und Steckbriefe. Freiburg.
- Roselt, K.; Reich, A.; Genske, D.; Gasterstedt, F.; Männel, L.; Quaas, I. et al. (2015): Energieeffizienz im Quartier – eine Einführung in das effort-Instrument. Broschüre. Online verfügbar unter <http://bit.ly/1NFbJzF>.



- Schwinghammer, Florian (2012): Thermische Nutzung von Oberflächengewässern. Masterarbeit. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Freiburg i. Br. Institut für Hydrologie.
- Stocker, Hans Ulrich; Abt, Peter (2012): Energie aus Seewasser für das Spital Männedorf. In: *Aqua & Gas* (12), S. 46–48.
- TLUBN (2019): Thüringer Wassergesetz. ThürWG. Online verfügbar unter https://landesrecht.thueringen.de/jportal/recherche3doc/WasG_TH_2019.pdf?json=%7B%22format%22%3A%22pdf%22%2C%22params%22%3A%7B%22filedPart%22%3A%22true%22%7D%2C%22docPart%22%3A%22X%22%2C%22docId%22%3A%22jlr-WasGTH2019rahmen%22%2C%22portalId%22%3A%22bsth%22%7D&_=%2FWasG_TH_2019.pdf.
- TLUBN (2021): informelle Stellungnahme zur Genehmigungsfähigkeit Seethermie, 09.06.2021.
- Tschan, Thomas; Watts, Robert (2018): Circulago. Wärme und Kälte aus dem Zugersee. In: *Aqua & Gas* (2), S. 34–39.
- UBA (1982): Bundesberggesetz. BBergG, vom Juni 2020. Fundstelle: Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/bbergg/>.
- wikipedia (2021): Algenbiomasse und ihr Tiefenverteilung in Seen mit unterschiedlichem Trophiegrad. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Ökosystem_See.
- VDI 2067, 2012-09: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenrechnung. Online verfügbar unter <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-2067-blatt-1-wirtschaftlichkeit-gebaeudetechnischer-anlagen-grundlagen-und-kostenberechnung-1>.

ANLAGE 1: Übersicht zu Wärmenetzen

| Klassifizierung | Eisnetz | Kältenetz | Quellnetz | niedertemperaturiges Abwärme-Wärmenetz | wechselwarmes Wärmenetz | umschaltbares Wärmenetz | niedertemperaturige Wärmenetze | hohtemperaturige Wärmenetze |
|-----------------------------|--|--|---|---|---|---|--|---|
| Einsatzgebiet | Kühlung | | kalte, intelligente Wärmenetze | | | konventionelle Wärmenetze | | |
| typisches Temperatur-Niveau | Vorlauf: -1 °C - 0 °C Rücklauf: 12 °C | Vorlauf: 6 °C Rücklauf: 12 °C | Vorlauf: 6 °C - 25 °C Rücklauf: 3 °C - 6 °C | Vorlauf: 25 °C - 45 °C Rücklauf: 10 °C - 20 °C | Sommer: VL: 25 °C - RL: 10 °C Winter: VL: 45 °C - RL: 25 °C | Sommer: VL: 30 °C - RL: 10-15 °C Winter: VL: 70 °C - RL: 30-40 °C | Sommer: VL: 70 °C - RL: 50 °C Winter: VL: 90 °C - RL: 70 °C | Sommer: VL: 90 °C - RL: 70 °C Winter: VL: 130 °C - RL: 90 °C |
| Betriebsweise | ganzjährig, bedarfsgerecht | ganzjährig, bedarfsgerecht | ganzjährig, abhängig vom Temperaturniveau der Quelle | ganzjährig, Temperaturführung abhängig von der Abwärmequelle | gleitende Fahrweise, bedarfsgerecht und Zieltemperatur-gesteuert | Sommer-Winter Umschaltung | ganzjährig | ganzjährig |
| Medium | Flüssigeis | Wasser | See- oder Flusswasser (alt. Sole) | aufbereitetes Wasser | aufbereitetes Wasser | aufbereitetes Wasser | aufbereitetes Wasser | aufbereitetes Wasser |
| Rohrsystem | konventionell, isoliert | konventionell, isoliert | Kunststoff, ohne Isolation | Kunststoff möglich, isoliert | Kunststoff möglich, isoliert | Kunststoff auch möglich, sonst konventionell, immer isoliert | konventionell, isoliert | konventionell, isoliert, hochdruckbeständig (15 bar) |
| Anwendung | Gewerbegebiete und Innenstädte mit hohem Kühlbedarf | Innenstädte (nur noch Bestandsanlagen - kein Neubau) | kleinere Netze von Oberflächengewässern (Seen, Flüsse), Grubenwasser und Abwasser; sowie mit Wärmeübertrager und Sole: Erdsonden, Erdkollektor oder Brunnenwasser | Neubauquartiere als Anrainer von niedertemperaturiger Abwärme | Neubauquartiere mit hohem Anteil Erneuerbarer Energieträger | zu sanierende Bestandsquartiere und /oder Wärmenetze mit hochexergetischen Spitzenlasten (z.B.: Hackschnitzel) | bewährtes Anlagenkonzept in Kleinstädten | bewährtes Anlagenkonzept in Großstädten |
| Vorteile | wesentlich effizienter als die Summe vieler Einzelkälteanlagen | sinnvoll beim Einsatz durch Absorptions-Kältemaschinen und Nutzung von Abwärme | kleinere Projekte mit kurzen Wegen (der Wärmeweg selbst gehört zur Wärmequelle) und / oder mit hohem sommerlichen Kühlbedarf | besonders wirtschaftlich und zukunftsfähig, „nahezu CO ² -Emissions frei | universell versorgbares Konzept mit hohem Nutzen und Zukunftssicherheit; das Netz selbst kann zur Aufnahme von Regelenergie und als Puffer genutzt werden | entwickelt zur Transformation konventioneller Wärmenetze oder der Umstellung von Quartieren mit Einzelheizungen auf eine dekarbonisierte <u>und</u> ökonomische Wärmeversorgung | bewährtes Anlagenkonzept in Kleinstädten | bewährtes Anlagenkonzept in Großstädten |

| Klassifizierung | Eisnetz | Kältenetz | Quellnetz | niedertemperaturiges Abwärme-Wärmenetz | wechselwarmes Wärmenetz | umschaltbares Wärmenetz | niedertemperaturige Wärmenetze | hohtemperaturige Wärmenetze |
|--------------------------|---|--|--|---|---|--|--|--|
| technische Besonderheit | durch die Nutzung latenter Wärme sehr große Kühlleistung (Faktor 5-8 zum typischen Kältenetz); neues Geschäftsfeld für Stadtwerke | zentrale Kälte aus sommerlicher Überschusswärme von BHKW über Absorptions-Kältemaschinen | bei jedem Anrainer wird eine Wärmepumpe benötigt, die durch die Wärmequelle kostengünstiger arbeitet als z.B. Luftwärmepumpen; sehr gut geeignet zum Heizen und Kühlen | die beim Anrainer benötigte Wärmepumpe arbeitet wesentlich effektiver mit deutlich besseren Leistungszahlen als kalte Quellen | die beim Anrainer benötigte Wärmepumpe muss nur die Temperatur auf das Niveau für die Warmwasserbereitung heben; sehr effektive Wärmeversorgung mit Leistungszahlen der Wärmepumpe bis zum Faktor 7. Vorteil bei z.B. MFH- oder Gewerbe-Quartieren o.ä. ist die Platzverschiebung, da die großen Heizlasten zentral gedeckt werden können und die WW-Versorgung mit kleinen WP oder Wohnungsstationen oder Durchlauferhitzern platzsparend je Gebäude abgewickelt werden können, gleichzeitig aber die Netzverluste eingespart werden | die in der Übergabestation enthaltene Wärmepumpe hebt im Bedarfsfall die Temperaturen auf das Soll und macht damit das Wärmenetz Prosumenten-fähig, zum "Mitmachnetz". Wichtig: Bindung des Netzes an "schlechtesten" Abnehmer entfällt durch den Bivalenzbetrieb mit der Wärmepumpe | ausgereifte Technik | ausgereifte Technik |
| ökonomische Besonderheit | momentan aus Wirtschaftlichkeitsgründen nur in etwas größerer Anwendung (mind. 100 kW Kühlleistung) umsetzbar | mit 6 K / m ³ sehr kleine Kühlleistung und relativ hoher Antriebsaufwand | mit besserem Nutzen als Erdwärmepumpen durch ganzjährig kontinuierlichere Quelltemperaturen. Zudem entfallen die aufwendigen Bohrungen für die einzelnen Erdsonden. | Nutzung bisher nicht genutzter Potenziale mit weitgehender Unabhängigkeit von Energieimporten | günstige Lösung zur energetischen Transformation der Energieversorgung gegenüber der Einzelhausversorgung; sehr vielfältige Nutzung von Synergien (ungenutzte Potenziale des Ortes) | günstige Lösung zur energetischen Transformation der Energieversorgung gegenüber der Einzelhausversorgung; sehr vielfältige Nutzung von Synergien (ungenutzte Potenziale des Ortes) | bisher gute und günstige Lösung | bisher gute und günstige Lösung |
| ökologische Besonderheit | arbeitet ohne Chemie (Kältemittel ist Wasser) | spart viel einzelne klimabedenkliche Kälteanlagen | durch bessere Leistungszahl bessere Ökobilanz | besonders gute Ökobilanz durch Nachnutzung von sonst kaum nutzbarer Abwärme | Nutzung von Erneuerbarer Energie außerhalb des eigenen Grundstückes (Scheune am Ortsrand) | Nutzung von Erneuerbarer Energie außerhalb des eigenen Grundstückes (Scheune oder Biogasanlage am Ortsrand) | abhängig von Öl, Gas und Kohle. Ausnahme Raum München mit Tiefengeothermie oder Anlagen mit thermischer Abfallbehandlung (Müllverbrennung) | abhängig von Öl, Gas und Kohle. Ausnahme Raum München mit Tiefengeothermie oder Anlagen mit thermischer Abfallbehandlung (Müllverbrennung) |

| Klassifizierung | Eisnetz | Kältenetz | Quellnetz | niedertemperaturiges Abwärme-Wärmenetz | wechselwarmes Wärmenetz | umschaltbares Wärmenetz | niedertemperaturige Wärmenetze | hohtemperaturige Wärmenetze |
|----------------------------|---|---|--|---|--|--|---|---|
| soziologische Besonderheit | betriebsübergreifende Nutzung - dadurch Kollektive Lösung von Klimaschutzaufgaben | kommunale Dienstleistung als Geschäftsmodell für Stadtwerke | Chance zur ökonomischen Dekarbonisierung von kleinen Ortschaften oder Siedlungen an Flüssen und Seen; interessant für eine Betriebsführung als Energiegenossenschaft | sektorübergreifend zwischen Industrie und Kommune | sektorübergreifend zwischen Industrie, Gewerbe, Kommune und Bürgerschaft; besonders geeignet für die Betriebsführung über eine Energiegenossenschaft | sektorübergreifend zwischen Industrie, Gewerbe, Kommune und Bürgerschaft; besonders geeignet für die Betriebsführung über eine Energiegenossenschaft | Gewinne der Stadtwerke unterstützen zum Beispiel die Subventionen des Nahverkehrs | Gewinne der Stadtwerke unterstützen zum Beispiel die Subventionen des Nahverkehrs |
| Zukunftsfähigkeit | erstmalig kann Kälte als Regelenenergie durch die sehr hohe Speicherkapazität von Flüssigeis bis zur saisonalen Speicherung eingesetzt werden | es werden selten Neuanlagen errichtet | fähig, auf bis zu 100 % Erneuerbare Energien transformiert zu werden | hohe Nachhaltigkeit | langfristige Versorgungssicherheit gegenüber Klimawandel, Energieimporten und dynamischer Gesetze | besondere Chance für den Gebäudebestand, ökologisch und ökonomisch den technologischen Wandel aus der fossilen Energieversorgung zu organisieren | nur sehr bedingt dekarbonisierbar | nur sehr bedingt dekarbonisierbar |
| Referenz (Stand 06/2021) | in Planung | Chemnitz | Lott in Achern (in Planung / Umsetzung) --> Flusswasser Schlier (in Umsetzung) --> Erdsonden Weißenburg (in Planung) --> Reinwasser aus Kläranlage weitere im frühen Stadium... | Meitingen Kerpen Horrem (in Planung) --> Grubenwasser Braunkohle-Tagebau | Haßfurt Flehingen, Erweiterung im Bau Kerpen, Vinger Weg (z.Z. im Probetrieb) Bedburg Kaster (in Planung / Umsetzung) --> Abwasser-Wärmetauscher Arbach (in Planung) --> Erdsonden aber dann gleitend wg. Argument vgl. Zeile 12 | Dollnstein St. Georg-Leipzig (in Bau) | alle Kleinstädte mit Fernwärme | alle Großstädte |

ANLAGE 2: Detailübersicht zu den Investitionskosten

| No. | Beschreibung | Anzahl Länge / Stk. | EP [€] | GP [€] | Nutzungsdauer (VDI 2067 Tab. 5) [a] | Kapitalzinssatz [%] | Annuität | Instandsetzung (VDI 2067 Tab. 5) [%] |
|------------|--|--|-----------|------------------|---|------------------------|--------------|--|
| 100 | Entnahme und Einleitung | | | 44.000 | 40 | 0,5 | 0,028 | 0 |
| | Rohrleitungen 2 X DN 150 | 200 m | 120 €/m | 24.000 | | | | |
| | Befestigungen Bootssteg, Filter | 1 | | 20.000 | | | | |
| 200 | Vakuum-Flüssigeis-Anlage | | | 358.300 | 15 | 0,5 | 0,069 | 2 |
| | VFA-Technik | 493 kW | | 350.300 | | | | |
| | Bau und IBN | Pauschal | | 8.000 | | | | |
| 300 | Übergabestation inkl. Wärmepumpe | 630 kW | | 256.900 | 15 | 0,5 | 0,069 | 1,5 |
| | Hafendorf | Kostenansatz Tilia | 320 kW | Formel | 107.000 | | | |
| | Seedorf | Kostenansatz Tilia | 260 kW | Formel | 94.400 | | | |
| | Walddorf | Kostenansatz Tilia | 40 kW | Formel | 30.400 | | | |
| | Camping | Kostenansatz Tilia | 10 kW | Formel | 13.100 | | | |
| | Speicher | Richtpreisanagebot Ratiotherm Oskar 2000 I | 3 Stk. | 4.000 €/Stck. | 12.000 | | | |
| 400 | Hausanschlussstationen inkl. TWW-Bereitung und ggf. Puffer | 153 Stk. | | 489.600 | 20 | 0,5 | 0,053 | 1,5 |
| | Übergabestation inkl. WMZ | Kostenansatz Tilia | 153 Stk. | 1.200 €/Stck. | 183.600 | | | |
| | Trinkwassermodul | Richtpreisanagebot Rathiotherm | 153 Stk. | 1.200 €/Stck. | 183.600 | | | |
| | Montage + Verbindungstechnik | Kostenansatz Tilia | 153 Stk. | 800 €/Stck. | 122.400 | | | |
| 500 | Wärmenetz | | | 1.218.000 | 40 | 0,5 | 0,028 | 0,5 |
| | Netzleitung Primärnetz nicht isoliert. inkl. Montage und Tiefbau | PE 100 RC, DN 125 ohne Isolierung | 1400 m | 280 | 392.000 | | | |
| | Sekundärnetz, KMR inkl. Verlegung und Tiefbau | DN 65, flexible Kunststoffleitung, eingepflügt | 1300 m | 400 | 520.000 | | | |
| | HA-Leitungen Material, Verlegung, Tiefbau | Vom Sekundärnetz zur Hausanschlussstation, Kostenschätzung Tilia | 153 Stk. | 2.000 | 306.000 | | | |
| 600 | Gebäude | | | 120.000 | 50 | 0,5 | 0,023 | 0,5 |
| | Technikzentrale für VFA und Netzpumpen, Bauhülle | | 1 Stk. | | 15.000 | | | |
| | Technikzentrale für VFA und Netzpumpen, Technik | | 1 Stk. | | 30.000 | | | |
| | Unterstationen für Wärmepumpen, Speicher und Netzpumpen - Bauhülle | | 3 Stk. | 15.000 | 45.000 | | | |
| | Unterstationen für Wärmepumpen, Speicher und Netzpumpen - Technik | | 3 Stk. | 10.000 | 30.000 | | | |
| 700 | Netz-Pumpen | | | 34.500 | 15 | 0,5 | 0,069 | 1,5 |
| | Pumpen Primärnetz | | 3 Stk. | 8.500 | 25.500 | | | |
| | Pumpen Sekundärnetze | Kostenschätzung Tilia, 3 Sekundärnetze, je 2 Pumpen | 6 Stk. | 1.500 | 9.000 | | | |
| 800 | EMSR | | | 15.000 | 10 | 0,5 | 0,103 | 2 |

| No. | Beschreibung | Anzahl Länge / Stk. | EP [€] | GP [€] | Nutzungsdauer (VDI 2067 Tab. 5) [a] | Kapitalzinssatz [%] | Annuität | Instandsetzung (VDI 2067 Tab. 5) [%] |
|------------------------|--------------------|---|-----------|----------------|---|------------------------|--------------|--|
| | Netzregelung | Kostenschätzung Tilia | pschl. | | 15.000 | | | |
| 900 | Nebenkosten | | | 271.205 | 20 | 0,5 | 0,053 | 0 |
| | Fachplaner | Ausführungsplanungen | | 0 | 150.000 | | | |
| | Vermessung | | | 0 | 20.000 | | | |
| | Gutachten | inkl. Genehmigungskosten | | 0 | 50.000 | | | |
| | Projektsteuerung | | pschl. | 5% | 51.205 | | | |
| 100 0 | Förderung | Wärmenetze 4.0; XX % auf alle Investitionskosten | | 30% | 842.252 | 20 | 0,5 | 0,053 |
| | Summe | | | | 1.965.254 | | | |

ANLAGE 3: Verteilung der Wärmebedarfe für räumliche Cluster der Wärmeanlage

| Nutzenergie Wärme gesamt je Nutzungseinheit [kWh/a] | | Hafendorf | Seedorf | Walddorf | | | Camping | Aktivhäuser |
|---|---------|-----------|---------|----------|--|--|---------|-------------|
| | | | | [kWh] | | | | |
| Appartements in Einzelhäusern | 554.400 | 158.400 | 330.000 | 66.000 | | | 0 | 0 |
| Appartements in Doppelhäusern | 330.000 | 165.000 | 165.000 | 0 | | | 0 | 0 |
| Appartements in komplexen Anlagen | 209.000 | 209.000 | 0 | 0 | | | 0 | 0 |
| Kreativ-/ Aktivunterkünfte | 82.500 | 0 | 0 | 0 | | | 0 | 82.500 |
| Hotelzimmer | 165.000 | 123.750 | 41.250 | 0 | | | 0 | 0 |
| Versorgungseinheiten | 52.800 | 13.200 | 13.200 | 13.200 | | | 13.200 | 0 |
| Gastronomie überdurchschn. | 26.400 | 13.200 | 13.200 | 0 | | | 0 | 0 |
| Gastronomie Standard | 9.900 | 0 | 0 | 9.900 | | | 0 | 0 |
| Sportzentrum | 13.200 | 13.200 | 0 | 0 | | | 0 | 0 |



INNOVATIONSREGION
MITTELDEUTSCHLAND

Kontakt

Metropolregion Mitteldeutschland Management GmbH
Schillerstraße 5
04105 Leipzig

0341 / 600 16 – 264
Gansler@mitteldeutschland.com

www.mitteldeutschland.com
www.innovationsregion-mitteldeutschland.com

Ein Projekt der



METROPOLREGION
MITTELDEUTSCHLAND