

Wärmepumpen an Fließgewässern

Analyse des theoretischen Potenzials in Bayern

Impressum

Herausgeber



Am Blütenanger 71
80995 München
+49 89 158121-0
info@ffe.de
www.ffe.de

Abschlussbericht zum Projekt

Wärmepumpen an Fließgewässern – Analyse des
theoretischen Potenzials in Bayern

Veröffentlicht am

19.04.2024

Projektleitung

Joachim Ferstl
Niklas Wettberg

Bearbeiter:innen

Joachim Ferstl
Niklas Wettberg
Michael Hinterstocker
Andreas Möbius

Stellv. wissenschaftlicher Leiter

Dr.-Ing. Serafin von Roon

Geschäftsleitung

Dr.-Ing. Serafin von Roon
Dr.-Ing. Christoph Pellingner
Dr.-Ing. Anna Gruber
Dr.-Ing. Andrej Guminski

Auftraggeber

Verband der Bayerischen Energie- und
Wasserwirtschaft (VBEW) e.V.

Vereinigung Wasserkraftwerke in Bayern (VWB) e.V.
und Landesverband Bayerischer Wasserkraftwerke eG

Verband kommunaler Unternehmen (VKU) e.V.,
Landesgruppe Bayern

Bitte zitieren als

FfE (2024): Wärmepumpen an Fließgewässern –
Analyse des theoretischen Potenzials in Bayern.

Wärmepumpen an Fließgewässern

Analyse des theoretischen Potenzials in
Bayern

Vorwort

Wir bedanken uns recht herzlich bei den Expert:innen, die im Zuge der Studie an der Durchführung der Interviews mitgewirkt und mit ihrer Fachexpertise zum Inhalt der Studie beigetragen haben. Wir betonen dabei, dass die interviewten Personen als Einzelpersonen und nicht zwingend als Vertreter:innen von Organisationen an dem Interview teilnahmen. Wir stellen klar, dass die Erkenntnisse aus den Interviews an den entsprechenden Stellen in den Abschlussbericht eingeflossen sind und gekennzeichnet wurden. Es ist explizit zu erwähnen, dass die Expert:innen keinen Einfluss auf die restlichen Inhalte der Studie hatten und somit weder die Zustimmung der Organisation noch der Einzelperson dazu impliziert wird.

Kurzzusammenfassung

1

Die Technologie ist einsatzbereit

Die Wärmepumpentechnologie ist ausgereift und für die Nutzung mit Fließgewässern als Wärmequelle geeignet. Dies zeigen auch die bisher umgesetzten Projekte. Fließgewässer bieten dabei gegenüber anderen Wärmequellen, wie z. B. Außenluft, einige Vorteile. Allerdings ist die Anwendung von Wärmepumpen in Verbindung mit Fließgewässern aufgrund ihrer Besonderheiten noch nicht ausreichend standardisiert.

2

Die Abkühlung von Gewässern ist grundsätzlich als positiv zu bewerten

Die Abkühlung von Fließgewässern durch den Einsatz von Wärmepumpen kann tendenziell als positiv betrachtet werden und ist in der Regel unkritischer als eine Erwärmung. Einheitliche regulatorische Vorgaben existieren hierzu jedoch nicht.

3

Die Flusslandschaft in Bayern bietet in vielen Regionen großes Potenzial

Die Ergebnisse zeigen, dass bereits eine teilweise Erschließung des vorhandenen Potenzials einen signifikanten Beitrag zur Deckung der Wärmenachfrage und somit auch zur Dekarbonisierung des Energiesystems leisten könnte.

4

Tatsächliches Potenzial hängt von vielen regional unterschiedlichen Faktoren ab

Bei der Erschließung des Potenzials und der Planung konkreter Anlagen sind unterschiedlichste Rahmenbedingungen und Standortfaktoren zu beachten. Neben der Wahl geeigneter und Erschließung neuer Standorte, u. a. an bestehenden (Wasser-)Kraftwerken oder Industriestandorten und der Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit sind hierbei insbesondere die regulatorischen Vorgaben sowie die vorhandenen Genehmigungsaufgaben entscheidend.

Inhaltsverzeichnis

1	Wärmebereitstellung durch Wärmepumpen an Fließgewässern	7
1.1	Technologieübersicht	7
1.2	Beispielprojekte	9
2	Potenzialanalyse	13
2.1	Methodik	13
2.2	Datengrundlage	14
2.3	Ergebnisauswertung	14
2.3.1	Gesamtpotenzial in Bayern	14
2.3.2	Saisonalität	15
2.3.3	Regionalisierte Betrachtungen	16
2.4	Anmerkungen zur Methode	17
3	Rahmenbedingungen beim Einsatz von Wärmepumpen an Fließgewässern	19
3.1	Methodenbeschreibung	19
3.2	Auswertung der Interviews	19
3.2.1	Technologie Status Quo	19
3.2.2	Randbedingungen, Einschränkungen und Hindernisse	20
3.2.3	Standortwahl und rechtlicher Rahmen	21
3.2.4	Vor- und Nachteile, Ausblick	22
4	Zusammenfassung	24
	Literaturverzeichnis	26

1 Wärmebereitstellung durch Wärmepumpen an Fließgewässern

1.1 Technologieübersicht

Im Hinblick auf die politischen Ziele im Wärmesektor müssen große Anstrengungen zur verstärkten Einbindung erneuerbarer Wärmequellen unternommen werden. Hierbei werden Wärmepumpen, insbesondere auch Großwärmepumpen, eine entscheidende Rolle einnehmen [1]. Ihre Anwendung in Fernwärmenetzen wird in Deutschland beispielsweise seit 2021 in Reallaborprojekten erforscht [2]. In anderen Ländern, wie z. B. in Schweden, Dänemark oder der Schweiz sind sie schon länger im Einsatz.

Verschiedene Fernwärmeversorger sehen in diesem Zuge den Einsatz von Wärmepumpen an Fließgewässern als einen wichtigen Baustein der notwendigen Dekarbonisierung an und haben bereits entsprechende Anlagen in Betrieb genommen [3]. Weitere Anlagen, auch in deutlich größeren Leistungsklassen, befinden sich derzeit an verschiedenen Standorten, wie z. B. in Hamburg oder Köln, in Planung [4] [5].

Funktionsweise von Wärmepumpen an Fließgewässern

Wärmepumpen an Fließgewässern unterscheiden sich in ihrer grundsätzlichen Funktionsweise nicht von herkömmlichen Wärmepumpen im Gebäudebereich. Anstelle von Luft, Erdreich oder Grundwasser dient hierbei jedoch ein nahegelegenes Fließgewässer als Umweltwärmequelle. Dem Gewässer wird dabei ein Teil der gespeicherten Wärme entzogen und durch den Einsatz elektrischer Antriebsenergie auf ein für Heizzwecke nutzbares Temperaturniveau gehoben.

Wasser besitzt im Vergleich zur Außenluft eine wesentlich höhere spezifische Wärmekapazität und sehr gute Wärmeübertragungseigenschaften. Wärmetauscher können daher bei gleicher Leistung kleiner dimensioniert werden und verursachen keine Schallemissionen durch Ventilatoren. Fließgewässer sind aufgrund ihres kontinuierlichen Abflusses besonders geeignet, da sich die Wärmequelle vergleichsweise schnell regenerieren kann und durch die natürliche Abflussdynamik ständig wärmeres Flusswasser zugeführt wird. Zudem schwanken die Temperaturen von Fließgewässern im tages- und jahreszeitlichen Verlauf

weniger stark als die Außenlufttemperaturen. [6] [1] [7] [8]

Die thermische Energie der Fließgewässer sorgt dafür, dass das flüssige Kältemittel im Wärmepumpenkreislauf verdampft. Durch die anschließende Komprimierung des Kältemittels im elektrischen Verdichter steigen Temperatur und Druck an. Im Kondensator wird diese Wärme des Kältemitteldampfs auf das Heizwasser übertragen und das Kältemittel dabei verflüssigt und abgekühlt, ehe der Druck des Kältemittels über ein Expansionsventil reduziert wird. Anschließend kann das Kältemittel bei niedriger Temperatur wieder die thermische Energie des Fließgewässers aufnehmen und der Kreislauf beginnt erneut.

Ausprägungen von Wärmepumpen an Fließgewässern

Beim Einsatz von Wärmepumpen an Fließgewässern existieren unterschiedliche Ausprägungen, wie die Wärme des Flusswassers zum Verdampfer der Wärmepumpe gelangen kann. Hier kann zwischen offenen und geschlossenen Systemen unterschieden werden. Bei einem offenen System findet eine aktive Wasserentnahme aus dem Gewässer mit Hilfe von entsprechenden Bauwerken statt, um das Wasser dem Verdampfer der Wärmepumpe zuzuführen, ehe es wieder in das Gewässer eingeleitet wird. Bei einem geschlossenen System erfolgt der Wärmeübertrag über einen im Fließgewässer platzierten separaten Wärmetauscher, so dass keine Wasserentnahme notwendig ist. [9] [10]

Aufgrund genehmigungsrechtlicher Auflagen sowie aus Gründen der Betriebssicherheit kann insbesondere bei offenen Systemen ein Zwischenkreislauf vorgesehen werden, bei dem ein weiterer Wärmetauscher eingesetzt wird [9]. Dabei wird die thermische Energie des Gewässers in einem ersten Wärmetauscher auf ein Wärmeträgermedium (i. d. R. Wasser-Glykol-Mischung) übertragen, welches in dem Zwischenkreislauf zirkuliert. Dieses strömt anschließend am Verdampfer der Wärmepumpe vorbei und sorgt für die Verdampfung des Kältemittels. Dabei wird ein direkter Kontakt zwischen der Wärmepumpe und dem Fließgewässer vermieden. Durch jeden zusätzlichen Wärmetauscher wird jedoch die nutzbare Gewässertemperatur und damit die Effizienz der Wärmepumpe reduziert.

Weitere Unterscheidungen der Anlagentechnik sind im Hinblick auf die Verdichter-Technologie möglich. Bei Verdichtern werden je nach Leistungsgröße und Temperaturhub vor allem Scroll-, Hubkolben-, Schrauben- oder Turboverdichter eingesetzt. Neben der verwendeten Verdichter-Technologie ist auch die Wahl des Kältemittels von großer Bedeutung. Dessen thermodynamische Eigenschaften müssen auf die konkreten Gegebenheiten abgestimmt werden. Dabei können natürliche oder synthetische Kältemittel eingesetzt werden, welche sich hinsichtlich ihres Treibhauspotenzials, der Brennbarkeit und der Toxizität unterscheiden. [1]

Im Zuge der F-Gase-Verordnung und der PFAS-Diskussionen ist eine zunehmende Einschränkung des Einsatzes synthetischer Kältemittel mit hohem Treibhauspotenzial vorgesehen. Der Einsatz natürlicher Kältemittel sowie deren Forschung und Entwicklung rückt dadurch zunehmend in den Fokus.

Effizienz von Wärmepumpen an Fließgewässern

Um die Umweltwärme nutzbar zu machen, wird eine externe Energiequelle – in der Regel Strom – benötigt. Die Leistungszahl (Coefficient of performance, COP) einer Wärmepumpe beschreibt das Verhältnis von erzeugter Wärme zur eingesetzten Energie zu einem bestimmten Zeitpunkt. Dieser Wirkungsgrad nimmt mit zunehmender Temperatur des Fließgewässers und abnehmender Temperatur der Wärmesenke (Vorlauftemperatur) zu. Die COP-Werte für vier beispielhafte Vorlauftemperaturen (in °C) sind in Abbildung 1-1 dargestellt. Für die Wärmepumpe wurde der Gütegrad $\eta=0,5$ angenommen. Dieser beschreibt das Verhältnis der tatsächlichen zur theoretisch möglichen Leistungszahl.

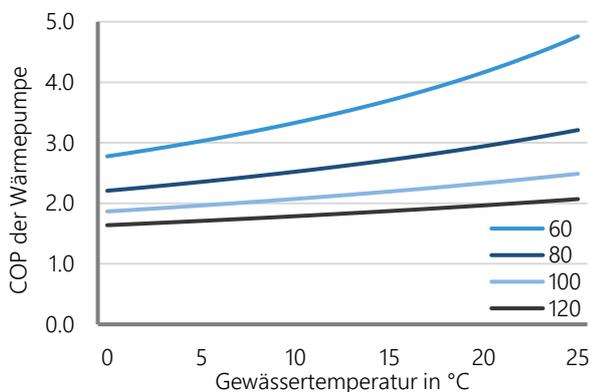


Abbildung 1-1: COP-Werte von Wärmepumpen in Abhängigkeit der Gewässertemperatur [°C] für vier verschiedene Vorlauftemperaturen [°C]

Das Verhältnis zwischen erzeugter Wärme und eingesetzter elektrischer Energie über ein ganzes Jahr wird

als Jahresarbeitszahl (JAZ) bezeichnet. Sie beschreibt die mittlere Effizienz im Jahresverlauf.

Gewässertemperatur und Volumenstrom

Für die Errichtung von Wärmepumpen an Fließgewässern werden in der Regel wasserrechtliche Genehmigungen benötigt, welche oftmals Auflagen zur maximal zulässigen Abkühlung sowie der ausleitbaren Wassermenge enthalten [1]. Bisher regelt die Oberflächengewässerverordnung [11] lediglich das Einleiten von Wärme in Oberflächengewässer, da diese Form der Nutzung von Flusswasser zur Kühlung von Industrieprozessen oder Kraftwerken bereits weit verbreitet ist. Mit [12] und [13] hat das Bayerische Landesamt für Umwelt hierzu bereits zwei Merkblätter herausgegeben. Die zulässigen Aufwärmspannen und Höchsttemperaturen des einzuleitenden Wassers hängen dabei vom Gewässertyp bzw. der jeweiligen Fischgemeinschaft ab.

Bei der Nutzung von Fließgewässern zu Heizzwecken wird das Wasser abgekühlt. Für die Einleitung von Wasser, das kälter ist als die Gewässertemperatur, gibt es bisher keine Vorgaben; als Orientierung wird jedoch die Aufwärmspanne der Oberflächengewässerverordnung (Anlage 7) als „Abkühlspanne“ empfohlen. Dies deckt sich mit den Vorgaben der Schweizer Gewässerschutzverordnung, welche sowohl für den Wärmeeintrag als auch für den Wärmeentzug in Fließgewässern gleiche maximal zulässige Temperaturänderungen vorschreibt (3 °C gegenüber unbeeinflusstem Zustand), welche in Gewässerabschnitten der Forellenregion verschärft werden (1,5 °C) [14].

Generell sind bei der Nutzung von Wärme aus Flüssen folgende Randbedingungen zu beachten: Zum einen ist eine minimale Rückführtemperatur (Frostschutzgrenze) nach dem Wärmetauscher zurück in den Fluss einzuhalten, zum anderen ist die nutzbare Durchflussmenge zum Entzug thermischer Energie begrenzt. Allgemeingültige Vorgaben existieren dazu nicht. Gemäß Literatur sollte die minimale Rückflusstemperatur 1 – 1,5 °C nicht unterschreiten, wobei zwischen Entnahme und Rückführung am Wärmetauscher eine Temperaturdifferenz von bis zu 5 – 10 K möglich ist (abgeleitet aus [15], [7], [9], [16]). Aus der minimalen Rückflusstemperatur und der Temperaturdifferenz am Wärmetauscher lässt sich die Minimaltemperatur des Flusses für eine Nutzung ermitteln. Kleinere Gewässer können in der Praxis allerdings oft nicht ganzjährig nutzbar sein, da ihre Temperaturen im Winter teilweise zu niedrig sind [17].

Die aus der Temperaturspreizung an der Wärmepumpe sowie der prozentualen Entnahmemenge aus dem Gesamtgewässer resultierende Abkühlung eines

Tabelle 1-1: Temperaturveränderung des Gesamtgewässers in K in Abhängigkeit der prozentualen Entnahmemenge und Temperaturspreizung im Wärmepumpen-Kreislauf in Anlehnung an [9]

	1 %	2 %	5 %	10 %	20 %	50 %	100 %
$\Delta T=1 \text{ K}$	0,01	0,02	0,05	0,10	0,20	0,50	1,00
$\Delta T=2 \text{ K}$	0,02	0,04	0,10	0,20	0,40	1,00	2,00
$\Delta T=3 \text{ K}$	0,03	0,06	0,15	0,30	0,60	1,50	3,00
$\Delta T=4 \text{ K}$	0,04	0,08	0,20	0,40	0,80	2,00	4,00
$\Delta T=5 \text{ K}$	0,05	0,10	0,25	0,50	1,00	2,50	5,00
$\Delta T=6 \text{ K}$	0,06	0,12	0,30	0,60	1,20	3,00	6,00

Fließgewässers ist in Tabelle 1-1 dargestellt. Hierfür wurden beispielhafte Temperaturdifferenzen an der Wärmepumpe von bis zu 6 K angesetzt, welche sich aus den in diesem Kapitel genannten Quellen und den Informationen aus den später folgenden Interviews ergeben. Hinsichtlich der prozentualen Entnahmemenge werden verschiedene Zwischenschritte zwischen 1 % und 100 % dargestellt. Entnahmemengen an einzelnen Standorten von mehr als 20 % sind hinsichtlich notwendiger Genehmigungen und der technischen Umsetzung als nicht realistisch zu betrachten und dienen lediglich der Veranschaulichung [9].

Erwärmungen von Fließgewässern sind tendenziell kritischer als Abkühlungen [17]. Eine moderate Abkühlung der Fließgewässer wird bezogen auf die Gewässerökologie in vielen Fällen als grundsätzlich positiv beurteilt, da sie den Auswirkungen der Klimaerwärmung, insbesondere im Sommer, teilweise entgegenwirkt [1] [18] [7]. Die physikalischen und ökologischen Auswirkungen, die mit einer thermischen Gewässernutzung einhergehen, werden in [6] und [19] detailliert beschrieben.

1.2 Beispielprojekte

In diesem Abschnitt werden zwei Beispielprojekte bereits umgesetzter Anlagen steckbriefartig vorgestellt. Die Steckbriefe basieren auf den Arbeiten in [1] und werden an geeigneten Stellen aktualisiert sowie um zusätzliche Informationen aus anderweitigen Quellen sowie den Interviews (siehe Kapitel 3) ergänzt.

Im Folgenden werden die wichtigsten Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beiden Anlagen beschrieben. Beide Projekte sind Teil der Reallaborprojekte der Energiewende und wurden dementsprechend ähnlich zügig umgesetzt. Beide Anlagen versorgen ein nachgeschaltetes Wärmenetz und müssen dabei ähnlich hohe Temperaturen bereitstellen. Dadurch ergeben sich ebenfalls ähnliche COP- und JAZ-Werte der beiden Wärmepumpen. Hinsichtlich der technischen Umsetzung wurden beide Anlagen in ein bestehendes System auf dem bereits vorhandenen Gelände integriert. Dabei konnte bei beiden Anlagen auf bereits vorhandene Entnahmebauwerke zur Wasserentnahme zurückgegriffen werden.

Die Anlagen unterscheiden sich vor allem hinsichtlich ihrer elektrischen und thermischen Leistung, was sich auch an den jeweiligen Entnahmevolumenströmen bemerkbar macht. Die Temperaturentwicklungen der Wärmepumpen auf das jeweilige Gesamtgewässer sind ebenfalls unterschiedlich und betragen in Rosenheim ein Vielfaches der Anlage in Mannheim, sind zugleich aber in beiden Fällen nicht problematisch. Dies ist auf das Verhältnis der Anlagengröße zur Gewässergöße zurückzuführen. Der relative Entnahmevolumenstrom aus dem gesamten Fließgewässer und die damit einhergehenden Temperaturentwicklungen sind bei der Anlage in Rosenheim aufgrund des kleineren Fließgewässers deutlich größer. Die Anlage in Rosenheim wird dabei im Unterschied zur Anlage in Mannheim neben der Nutzung im Heizbetrieb auch zu Kühlzwecken eingesetzt. Dabei wird das Gewässer entsprechend erwärmt.¹

¹ Alternativ kann im Sommer die im Heizbetrieb erzeugte Wärme beim Kunden über Sorptionskältemaschinen zu Kühlzwecken verwendet werden, ohne die Gewässer zu erwärmen.

Ebenfalls sind die einzelnen Wärmepumpen in Rosenheim Teil von innovativen Kraft-Wärme-Kopplungs-Systemen (iKWK-Systemen), bei denen sie durch einen Gasmotor und einen Elektrokessel ergänzt werden. Dadurch ergeben sich auch Unterschiede in den jeweiligen Betriebsstunden.

Aufgrund der unterschiedlichen Leistungsgrößen unterscheiden sich die Wärmepumpenanlagen auch in den jeweiligen Schlüsselkomponenten. Hier werden bei den kleineren Anlagen in Rosenheim Schrauben- und Kolbenverdichter sowie mit Ammoniak ein natürliches Kältemittel verwendet. Dagegen kommt bei der Großwärmepumpe in Mannheim ein Radialverdichter (Turboverdichter) und mit R1234ze(E) ein synthetisches Kältemittel mit deutlich größeren Füllmengen zum Einsatz.

Steckbrief Flusswasser-Wärmepumpe Mannheim in Anlehnung an [1]

Allgemeine Daten

Betreiber	MVV AG
Weitere Projektbeteiligte	IER Universität Stuttgart, Fraunhofer ISE, AGFW
Standort	Mannheim (DE)
Objektyp	Flusswärmepumpe für Fernwärmenetz (offenes System)
Baustart	April 2022
Inbetriebnahme	Oktober 2023
Wärmequelle	Flusswasser (Rhein) Entnahmeevolumenstrom für Wärmepumpe: 800–1000 l/s (ca. 60 m ³ /s für Kühlwassernutzung genehmigt) ¹ Abkühlung des Entnahmeevolumenstroms: $\Delta T = 1,8\text{--}3,8\text{ K}^1$ Minimale Rückführtemperatur: 1,2 °C ¹ Temperatur Wärmequelle: 3–25 °C; während Heizperiode: 3–12 °C (Mindesttemperatur für Betrieb: 3 °C) ¹ Temperaturveränderung des Gesamtflusses durch Wärmepumpenbetrieb: sehr gering (kaum messbar, ca. 0,0006 K) ¹
Wärmesenke	Fernwärme Vorlauftemperatur Wärmepumpe: 83–99 °C Vorlauftemperatur Fernwärmenetz: 83–129,9 °C Rücklauftemperatur Fernwärmenetz: 60 °C
COP	2,5–3,0 (JAZ geplant 2,7)

Technische Daten

Hersteller Wärmepumpe	Siemens Energy
Fabrikat	SHP 600
Thermische Leistung	20,5 MW
Elektrische Leistung	7 MW (Lastbereich: 65–100 Prozent)
Kompressor	Radialverdichter (zweistufig)
Kältemittel	R1234ze(E) (HFO, synth. Kältemittel), ~12.000kg
Abmessungen	18 x 8,8 x 5,3 m
Gewicht	142 t
Schalldruckpegel	99 dB(A) ¹
Betriebsstunden	2.000 h pro Jahr
Zusätzliche Systeme	4 Steinkohle-Heizkraftwerksblöcke (insgesamt 1.500 MW)
Wärmespeicher	43.000 m ³ , 1.500 MWh, Planung und Bau: Großkraftwerk Mannheim (GKW)
Steuerungssystem	Omnivise T3000, Hersteller Siemens Energy

CO₂-Vermeidung, Investitionsvolumen und Förderung

CO ₂ -Vermeidung	10.000 t pro Jahr
Investitionsvolumen	15 Mio. €
Förderung	BMWK-Reallabor (Investitionsförderung sowie Förderung des Betriebs für drei Jahre)

Quellen: [20], [3], [21], ¹Expert:innen-Interviews

Steckbrief Flusswasser-Wärmepumpe Rosenheim in Anlehnung an [1]

Allgemeine Daten

Betreiber	Stadtwerke Rosenheim
Weitere Projektbeteiligte	IER Universität Stuttgart, Fraunhofer ISE, AGFW
Standort	Rosenheim (DE)
Objektyp	Bachwasserwärmepumpe für Fernwärmenetz (offenes System)
Baustart	März 2021
Inbetriebnahme	Juni 2022 (iKWK 1), Dezember 2022 (iKWK 2), Oktober 2023 (iKWK 3)
Wärmequelle	Flusswasser (Mühlbach), gerecht und gesiebt Entnahmeevolumenstrom für Wärmepumpe: 40 l/s ¹ Abkühlung des Entnahmeevolumenstroms: $\Delta T = 3\text{--}6\text{ K}^1$ Minimale Rückführtemperatur: 1 °C ¹ Temperatur Wärmequelle: 3–21 °C; während Heizperiode: 3–12 °C (Mindesttemperatur für Betrieb: >3 °C ¹ Temperaturveränderung des Gesamtflusses durch Wärmepumpenbetrieb: max. 0,5 K ¹
Wärmesenke	Fernwärme Vorlauftemperatur Wärmepumpe: 88 °C, anschließend Temperaturerhöhung auf 90–120 °C durch Dampf-Wärmeübertrager aus Müllverbrennungsanlage
COP	2,5–2,8

Technische Daten

Hersteller Wärmepumpe	Johnson Controls
Fabrikat	SaBROE/NS-DualPAC
Thermische Leistung	Wärme: 3 x 1.566 kW; Kälte: 3 x 1.105 kW
Elektrische Leistung	3 x 628 kW (Lastbereich: 40–100 Prozent)
Kompressor	Doppelstufiges Aggregat aus Schrauben- und Kolbenverdichter
Kältemittel	R717 (Ammoniak, natürliches Kältemittel), ca. 3 x 260 kg
Abmessungen	6,7 x 4,0 x 2,6 m je WP
Gewicht	19 t je WP
Schalldruckpegel	108,9 dB(A)
Betriebsstunden	4500 Vollbenutzungsstunden der Wärmepumpe
Zusätzliche Systeme	Wärmepumpe werden in 3 iKWK-Anlagen ergänzt um: 3 x Gasmotor (je 4,5 MW _{el} und 4,7 MW _{th} ; 3500 Vollbenutzungsstunden), 2 x Elektrokessel (1,8 MW _{th} und 3,3 MW _{th} ; 500 Vollbenutzungsstunden)
Wärmespeicher	1.000 m ³

CO₂-Vermeidung, Investitionsvolumen und Förderung

CO ₂ -Vermeidung	16.500 t pro Jahr für 3 iKWK
Investitionsvolumen	3,8 Mio. € (Wärmepumpen), 8,5 Mio. € (inkl. Gebäude u. Anbindung)
Förderung	iKWK-Zuschlag, BMWK-Reallabor

Quellen: [22], [23], [24], [25], ¹Expert:innen-Interviews

2 Potenzialanalyse

2.1 Methodik

In diesem Abschnitt wird die Methodik zur Ermittlung des theoretischen Potenzials erläutert. Hierbei wird zwischen dem gesamten Wärmebereitstellungspotenzial und dem thermischen Potenzial der Fließgewässer unterschieden. Das gesamte Wärmebereitstellungspotenzial setzt sich aus dem thermischen Potenzial der Fließgewässer und einem zusätzlichen Anteil an Wärme aus der elektrischen Energie der Wärmepumpe zusammen. Dieser elektrische Anteil wird durch die COP- bzw. JAZ-Werte bestimmt und ist dadurch von individuellen Gegebenheiten, wie der Gewässertemperatur und den benötigten Vorlauftemperaturen, abhängig (vgl. Abbildung 1-1).

Das thermische Potenzial der Fließgewässer E_{Fluss} wird anhand folgender Formel bestimmt [17]:

$$E_{Fluss} = c_{Wasser} \cdot Q \cdot \Delta T \cdot t \quad (1)$$

Dabei wird angenommen, dass ein Gewässer mit der Durchflussmenge Q um den Wert ΔT abgekühlt wird. Über den Betrachtungszeitraum t und unter Berücksichtigung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser c_{Wasser} von $1,1617 \frac{kWh}{m^3K}$ lässt sich dadurch das thermische Potenzial ermitteln.² Hierbei wird der zusätzliche Wärmeanteil durch die elektrische Antriebsenergie E_{WP} nicht berücksichtigt. Dieser ist vor allem für die Betrachtung einzelner Anwendungsfälle relevant und kann anhand folgender Formeln unter Annahmen zur Vorlauftemperatur T_o in °C, Gewässertemperatur T_s in °C und Gütegrad η bestimmt werden [17] [16]:

$$E_{WP} = \frac{1}{COP - 1} E_{Fluss} \quad (2)$$

$$COP = \eta \frac{T_o + 273,15}{T_o - T_s} \quad (3)$$

Dadurch lässt sich wiederum das gesamte Wärmebereitstellungspotenzial ermitteln:

² Bei einem Durchfluss von $Q = 1 \frac{m^3}{s}$ und einer Abkühlung von $\Delta T = 1$ K ergibt sich ein thermisches Potenzial von 36,7 GWh pro Jahr, was einer Leistung von 4,19 MW entspricht.

$$E_{Ges} = E_{Fluss} + E_{WP} \quad (4)$$

Im Folgenden wird nur noch das thermische Potenzial der Fließgewässer E_{Fluss} , welches dem Gewässer unter Verwendung des gesamten Durchflussvolumens bei verschiedenen zulässigen und denkbaren Temperaturabsenkungen gemäß Formel (1) entzogen werden kann, betrachtet und zur Vereinfachung als *theoretisches Potenzial* bezeichnet. Die elektrische Antriebsenergie der Wärmepumpe wird ausdrücklich nicht berücksichtigt.

Für die Temperaturabsenkung ΔT werden Werte zwischen 0,5 K und 3 K angenommen. Diese ergeben sich aus den in Abschnitt 1.1 beschriebenen Vorgaben der Oberflächengewässerverordnung (Anlage 2, Anforderungen an den guten ökologischen Zustand und das gute ökologische Potenzial) und der entsprechenden Schweizer Gesetzgebung [11] [14]. Je nach Quelle und Fischbestand der Gewässer sind Temperaturänderungen von max. 1–3 K zulässig bzw. empfohlen. In [15] werden Abweichungen von 1 K gegenüber dem Ausgangszustand als grundsätzlich unwesentlich bezeichnet. Dabei handelt es sich allerdings nicht um allgemeingültige Regelungen. Mehr als 3 K Abkühlung des Gesamtgewässers ist laut keiner Quelle möglich. Diese Annahmen decken sich auch mit ähnlichen Potenzialermittlungen in [17], [16], [9] und [26].

Für die Potenzialanalyse wird das Durchflussvolumen Q einzeln für jedes der betrachteten Fließgewässer erhoben. Hierfür wird je eine Messstation entlang des Fließgewässers ausgewählt. Sofern für ein Fließgewässer nur eine Messstelle verfügbar ist, werden deren Daten verwendet. Sind für ein Fließgewässer mehrere Messungen vorhanden, wird diejenige verwendet, welche am weitesten flussabwärts gelegen ist. Die Potenzialberechnung erfolgt unter der Annahme, dass das jeweilige Fließgewässer insgesamt um die Temperaturdifferenz ΔT abgekühlt wird.

Unter Verwendung der Messungen von Q an den ausgewählten Messstellen wird nun anhand der in Formel (1) beschriebenen Methode das theoretische Potenzial für jedes Fließgewässer individuell berechnet.

Zur Berücksichtigung saisonaler Effekte erfolgt dies mit monatlicher Genauigkeit (siehe Kapitel 2.3.2). Dafür werden für die Messungen von Q an den ausgewählten Messstellen monatliche Mittelwerte gebildet. Zudem werden diese über den Zeitraum von 1990 bis 2022 gemittelt, um den Einfluss besonderer Witterungsbedingungen in einzelnen Jahren zu minimieren (siehe Kapitel 2.2). Die Berechnung des theoretischen Potenzials erfolgt zunächst je Monat und anschließend durch Bildung der Summe aller Monatswerte für das gesamte Jahr.

Ergänzende Erläuterungen zum gewählten methodischen Ansatz sind in Kapitel 2.4 zu finden.

2.2 Datengrundlage

Als Datengrundlage werden Messdaten des Gewässerkundlichen Dienstes Bayern (GKD) verwendet. Für diese Studie wurden über die Datenstelle des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) alle verfügbaren historischen Daten bayerischer Messstellen zwischen 1990 und einschließlich 2022 angefragt. Die Datenlieferung umfasst insgesamt 557 Messstationen an Flüssen, von denen 528 eine Messung des Durchflusses enthalten. In den Stammdaten der Messstationen sind unter anderem deren Standort und der Name des zugehörigen Fließgewässers enthalten. Die Messwerte liegen in der Regel als 15- oder 60-Minuten-Mittelwerte vor. Vor dem 01.01.2007 liegen die Daten als hochaufgelöste Diskretwerte vor, zwischen denen linear interpoliert werden kann. Die einzelnen Messwerte sind jeweils mit einem Prüfstatus versehen, der angibt, ob es sich um geprüfte (d. h. vertrauenswürdige) Daten handelt oder nicht. Daten, die nicht geprüft sind, können dabei stimmen, müssen es aber nicht. Von allen Einzelmesswerten der 528 Stationen mit einer Durchflussmessung sind etwa 99,6 % geprüft. Im Rahmen dieser Studie werden ausschließlich geprüfte Werte betrachtet. Des Weiteren werden nur diejenigen Messstellen betrachtet, deren Messwerte für den oben genannten Zeitraum von 1990 bis einschließlich 2022 verfügbar sind. Schließt man alle Messstellen aus, deren Zeitreihen geprüfter Werte diesen Zeitraum nicht abdecken, verbleiben 470 der insgesamt 528 Messstellen.

Neben den gewässerkundlichen Daten werden für die Potenzialanalyse amtliche Geodaten herangezogen. Dabei handelt es sich um Daten zum Fließgewässernetz aus dem digitalen Gewässerverzeichnis Bayern in 1:25.000 (FGN25) in der Version 2016. In dem Datensatz sind die Gewässerachsen der bayerischen Fließgewässer mit Attributen wie z. B. der Gewässerbreite, Gewässerkennzahl oder der Widmung verknüpft. Die

Daten wurden ebenfalls über das LfU bezogen. Für diese Studie werden alle Fließgewässer mit der Widmung I. oder II. Ordnung verwendet. Aufgrund der detaillierten Attribute liegen die Geometrien als Teilstücke vor. Alle Teilstücke, die als „fiktive Verbindung in Seen und Teichen“ oder „Sickerstrecken“ gekennzeichnet oder mit dem Zusatz „Gewässerverlauf unklar“ versehen sind, werden nicht betrachtet. Ebenfalls ausgeschlossen werden Teilstücke mit unbekannter Widmung oder ohne Namen. Die verbleibenden Teilstücke werden nach dem Namen des Fließgewässers oder nach der Gewässerkennzahl aggregiert.

Nachfolgend werden die Messstationen anhand des Gewässernamens in den Stammdaten mit den Fließgewässern verknüpft. Alle Fließgewässer, für die keine Messstation vorhanden ist, werden in der Potenzialanalyse nicht berücksichtigt. In Abbildung 2-1 sind alle Fließgewässer I. und II. Ordnung dargestellt. Diejenigen, für die keine Messdaten zum Durchflussvolumen vorliegen, sind rot gefärbt.



© GeoBasis-DE / BKG 2017 | Generalisierung: FFE e.V.
ATKIS ®, DLM1000; Copyright © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2008

Abbildung 2-1: Im Rahmen der Potenzialbewertung aufgrund der Durchflussmessung berücksichtigte (blau) und nicht berücksichtigte (rot) Fließgewässer I. und II. Ordnung.

2.3 Ergebnisauswertung

2.3.1 Gesamtpotenzial in Bayern

Im Rahmen der Gesamtpotenzialanalyse wird das gesamte theoretische Potenzial in Bayern für verschiedene Temperaturspreizungen ΔT abgeschätzt, indem die theoretischen Potenziale aller betrachteten

Fließgewässer nach der Methode in Kapitel 2.1 berechnet und nachfolgend summiert werden.

Die Summe des jährlichen theoretischen Potenzials in Bayern in Abhängigkeit von ΔT ist in Tabelle 2-1 dargestellt. Der aus Formel (1) hervorgehende lineare Zusammenhang aus theoretischem Potenzial und angenommener Temperaturspreizung ist deutlich zu erkennen. So erhöht sich das theoretische Potenzial bei einem Anstieg von ΔT um 0,5 K jeweils um den Wert des theoretischen Potenzials bei einem ΔT von 0,5 K.

Zur besseren Einordnung dieser theoretischen Potenziale werden die Werte im Kontext der Wärmenachfrage in Bayern betrachtet. Hierfür wird der Endenergieverbrauch im Gebäudesektor (Sektoren „private Haushalte“ und „Gewerbe, Handel und Dienstleistungen“) für die Anwendungen Raumwärme und Warmwasser in Bayern aus der Studie „Bayernplan Energie 2040“ für 2019 in Höhe von 142,5 TWh herangezogen [27]. Im Rahmen des Gutachtens „Bewertung Masterplan Geothermie“ der TU München (TUM) wird die Wärmenachfrage für Raumwärme und Warmwasser mit 159,3 TWh geschätzt [28].

Es ist erkennbar, dass sich das theoretische Potenzial in einer ähnlichen Größenordnung wie der Wärmebedarf in Bayern für Raumwärme und Warmwasseraufbereitung bewegt. Auch wenn das theoretische Potenzial für bestimmte Annahmen bei der Abkühlung in Summe über das Jahr höher ist als die oben genannten Wärmebedarfe, ist aufgrund saisonaler Effekte und regionaler Unterschiede (siehe Kapitel 2.3.2 und 2.3.3) eine vollständige Deckung jedoch nur bilanziell möglich.

Tabelle 2-1: Theoretisches Potenzial und Deckungsgrad für Bayern in Abhängigkeit der Temperaturspreizung

ΔT in K	theoretisches Potenzial in TWh / Jahr
0,5	57,0
1	114,1
1,5	171,1
2	228,1
2,5	285,1
3	342,2

2.3.2 Saisonalität

In Abhängigkeit der Schwankungen sowohl des Durchflussvolumens von Fließgewässern als auch der Wärmenachfrage im unterjährigen Verlauf ist eine zeitlich differenzierte Betrachtung sinnvoll. So steht das in Kapitel 2.3.1 ausgewiesene Potenzial nicht gleichmäßig, sondern mit saisonalen Unterschieden zur Verfügung. Die Wärmenachfrage unterliegt ebenfalls saisonalen und hauptsächlich temperaturbedingten Schwankungen. Um diese abzubilden, wird der monatliche Gasverbrauch von Standardlastprofil-Kunden (SLP) in Deutschland zwischen 2018 und 2021 herangezogen [29]. Darunter fallen Kunden aus den Sektoren „private Haushalte“ sowie „Gewerbe, Handel und Dienstleistungen“ mit einem Jahresgasverbrauch bis 1,5 GWh. Anhand dieses Indikators wird der angenommene Wärmebedarf für Raumwärme und Warmwasser in Bayern von 142,5 TWh (siehe Kapitel 2.3.1) auf die Monate des Jahres verteilt. Aufgrund der monatlichen Auflösung bei der vorherigen Analyse liegen die ausgewiesenen theoretischen Potenziale bereits in monatlicher Auflösung vor. Abbildung 2-2 zeigt den Energieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser sowie das theoretische Potenzial für Bayern in Abhängigkeit von verschiedenen Temperaturspreizungen ΔT .

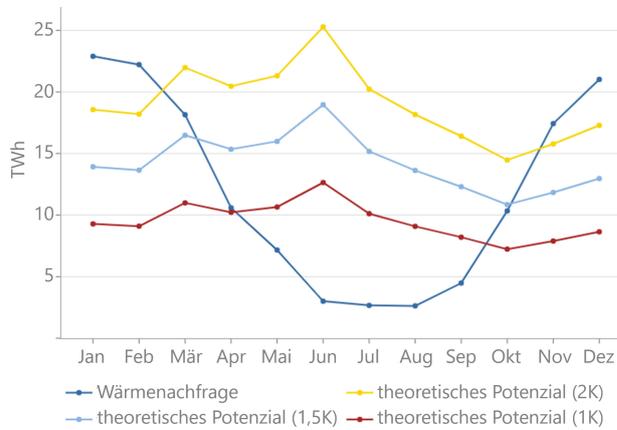


Abbildung 2-2: Wärmenachfrage und theoretisches Wärmebereitstellungspotenzial in Bayern je Monat in Abhängigkeit der angenommenen Temperaturspreizung

Zunächst ist deutlich zu erkennen, dass sich die Wärmenachfrage im Jahresverlauf entgegengesetzt zum theoretischen Potenzial verhält. So ist vor allem in den Monaten zwischen Oktober und März (je nach Temperaturspreizung) die Nachfrage größer als das theoretische Potenzial. Bei einer Temperaturabsenkung von 2 K spielen saisonale Effekte eine untergeordnete Rolle. Obwohl die Nachfrage hier zwischen November und einschließlich Februar größer als das theoretische Potenzial ist, ergibt sich hier noch ein Deckungsgrad von 95 % über das gesamte Jahr. Eine reduzierte Temperaturspreizung von 1,5 K führt zu einem

Deckungsgrad von 87 %. Bei 1 K ergibt sich neben einem längeren Zeitraum in Unterdeckung (Oktober bis einschließlich April) ein Deckungsgrad von etwa 75 %.

Saisonale Effekte spielen sowohl bei der Wärmenachfrage als auch bei der Wärmebereitstellung durch Fließgewässer-Wärmepumpen eine wichtige Rolle. Bei der Potenzialbewertung und der Planung konkreter Projekte sollten sie daher entsprechend mit einbezogen werden.

2.3.3 Regionalisierte Betrachtungen

Im Rahmen der Studie wird das gesamte theoretische Potenzial für Bayern auf Gemeindeebene regionalisiert. Dafür wird das theoretische Gesamtpotenzial, welches sich bei einer angenommenen Temperaturspreizung von 1,5 K ergibt, zugrunde gelegt. Zunächst werden die Gewässerachsen aller in Kapitel 2.3.1 berücksichtigten Fließgewässer mit den Gemeindegrenzen verschnitten. Das theoretische Potenzial jedes Fließgewässers wird nachfolgend auf alle Gemeinden verteilt, welche von dessen Gewässerachse geschnitten werden. Die Verteilung erfolgt gewichtet anhand des Anteils an Flusskilometern innerhalb der Gemeinde an der Gesamtlänge des Fließgewässers. Wird eine Gemeinde von mehreren Fließgewässern durchflossen, wird das anteilige Potenzial dieser Fließgewässer innerhalb der Gemeinde aufsummiert. Mit diesem Ansatz wird 52 % der bayerischen Gemeinden im Rahmen der Regionalisierung ein theoretisches Potenzial zugewiesen. Die restlichen 48 % überschneiden sich mit keinem der betrachteten Fließgewässer, weshalb für diese im Rahmen der Studie kein Potenzial ausgewiesen wird (siehe Kapitel 2.4).

Der angenommene Wärmebedarf in Bayern (siehe Kapitel 2.3.1) liegt auf Landkreisebene vor. Dieser wird nach der Regionalisierung in [30] basierend auf der Wohnfläche nach Gebäudetyp und Baualterklasse (in Kombination mit spezifischen Verbrauchswerten) weiter auf die Gemeindeebene disaggregiert. Davon ausgehend wird je Gemeinde analog zur Vorgehensweise in Kapitel 2.3.1 der individuelle Wärmebedarf anhand des Gasverbrauchs auf die Monate des Jahres verteilt. Anschließend wird der theoretische Deckungsgrad je Gemeinde aus deren Wärmebedarf und theoretischem Potenzial für jeden Monat des Jahres erhoben.

In Abbildung 2-3 sowie Abbildung 2-4 ist der Deckungsgrad auf Gemeindeebene für die Monate Januar beziehungsweise Juni dargestellt. Hohe Deckungsgrade ergeben sich entlang der Donau und den Einzugsgebieten ihrer Zuflüsse Isar, Inn und Salzach im Süden sowie Naab und Würnitz im Norden. Im Einzugsgebiet des Main finden sich im

Bereich der Rodach, der Itz sowie der Fränkischen Saale hohe Deckungsgrade.

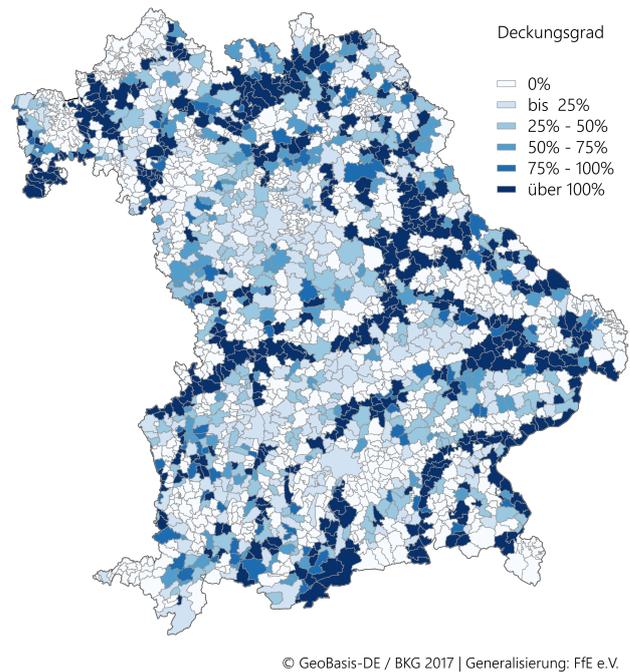


Abbildung 2-3: Deckungsgrad je Gemeinde für Januar

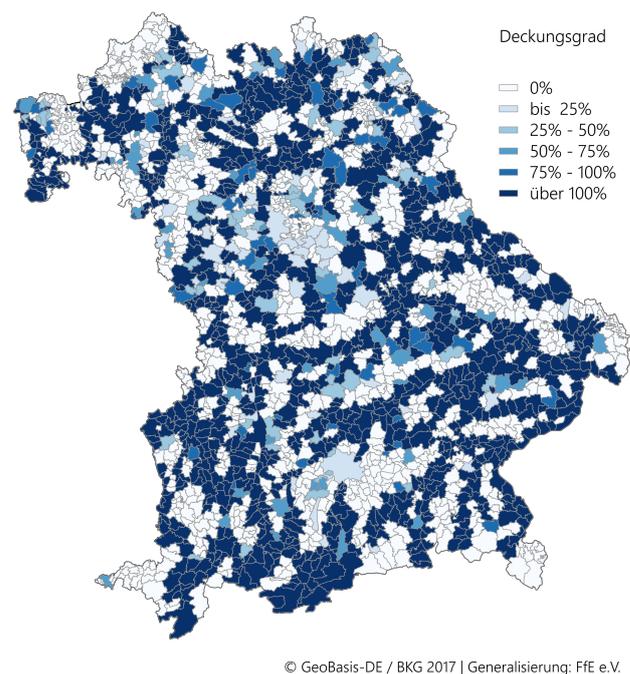


Abbildung 2-4: Deckungsgrad je Gemeinde für Juni

Aufgrund der niedrigen Wärmenachfrage und der hohen Potenziale im Sommer (vgl. Abbildung 2-2), ergibt sich für Juni bei etwa 80 % der Gemeinden, denen ein Potenzial zugewiesen wird, ein Deckungsgrad von mindestens 100 %. Im Januar hingegen trifft das auf lediglich 41 % dieser Gemeinden zu, da sich das Verhältnis zwischen Wärmenachfrage und dem theoretischen Potenzial in den Wintermonaten im Allgemeinen umkehrt. Bei über einem Drittel (37 %) der

Gemeinden, denen ein Potenzial zugewiesen wird, reicht das ausgewiesene theoretische Potenzial unter den beschriebenen Annahmen zur vollständigen, ganzjährigen Deckung der oben beschriebenen Wärmenachfrage. Dies entspricht knapp einem Fünftel aller Gemeinden in Bayern (19 %). Hier liegt der Deckungsgrad in jedem Monat des Jahres bei mindestens 100 %. Nimmt man eine Abkühlung von 2 K an, erhöht sich der Wert auf etwa ein Viertel aller bayerischen Gemeinden (24 %).

2.4 Anmerkungen zur Methode

Diese Studie hat zum Ziel, das theoretische Potenzial von Wärmepumpen an Fließgewässern in Bayern abzuschätzen. Da bei der Umsetzung konkreter Projekte immer eine Vielzahl an Faktoren berücksichtigt werden muss, die in vielen Fällen auch stark vom Standort abhängig sind, werden bei der Betrachtung des Potenzials für ganz Bayern gewisse Annahmen getroffen und Vereinfachungen vorgenommen, welche wiederum Einfluss auf das ausgewiesene theoretische Potenzial haben. Dies soll im Folgenden kritisch diskutiert werden.

Limitierte Berücksichtigung von Fließgewässern

Zunächst ist zu erwähnen, dass nicht alle Fließgewässer bei der Potenzialabschätzung in Kapitel 2.3 berücksichtigt werden. Im Bayerischen Wassergesetz (BayWG) werden oberirdische Gewässer nach ihrer wasserwirtschaftlichen Bedeutung anhand der sogenannten Widmung kategorisiert. In dieser Studie werden nur Fließgewässer I. und II. Ordnung betrachtet. Dadurch wird das Potenzial an Fließgewässern anderer Widmung unterschlagen und somit das gesamte theoretische Potenzial entsprechend unterschätzt. Allerdings handelt es sich bei Gewässern III. Ordnung und sonstigen Fließgewässern zumeist um kleine Gewässer und Bäche. Hierdurch wird für Gemeinden, welche keine Überschneidung mit Fließgewässern I. oder II. Ordnung aufweisen, im Rahmen dieser Studie kein Potenzial ausgewiesen. In der Realität bestehen entsprechende Potenziale für Fließgewässerwärmepumpen aber auch an kleineren Gewässern. Zudem konnten vereinzelte Fließgewässer I. und II. Ordnung aufgrund der Nichtverfügbarkeit von Messdaten nicht berücksichtigt werden. Dadurch fallen etwa 19 % der in Frage kommenden Flusslänge der Fließgewässer I und II. Ordnung bei den Betrachtungen weg (siehe auch Abbildung 2-1).

Vereinfachungen im Zuge der Potenzialschätzung

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, wird nur das thermische Potenzial der Fließgewässer betrachtet. Der Anteil der Wärmepumpe am Wärmebereitstellungspotenzial ist stark von den JAZ- bzw. COP-Werten abhängig. Im Rahmen der Studie werden diese Werte nicht berücksichtigt, da sie stark vom Standort und der individuellen Anwendung (Gewässertemperatur, Vorlauftemperatur, etc.) abhängen. Dies würde dem Ziel einer standortunabhängigen und ganzheitlichen theoretischen Potenzialuntersuchung teilweise widersprechen. Das insgesamt Wärmebereitstellungspotenzial würde sich bei einer Berücksichtigung um den elektrischen Anteil E_{WP} erhöhen. Gemäß Formel (2) und (4) würde E_{Ges} beispielsweise bei einem COP-/JAZ-Wert von 3 dem 1,5-fachen E_{Fluss} entsprechen.

Aufgrund des dafür notwendigen Detailgrads werden keine Annahmen zu möglichen Standorten der Wärmepumpen getroffen. Daher wird das theoretische Potenzial je Fließgewässer berechnet und im Rahmen der Regionalisierung auf die angrenzenden Gemeinden verteilt. In der Realität addieren sich die anteiligen Temperaturveränderungen des Gesamtgewässers, die sich aus den konkreten Dimensionierungen mehrerer Anlagen gemäß Tabelle 1-1 ergeben, entlang des Flussverlaufs auf. Die Studie unterscheidet also nicht, ob das theoretische Potenzial eines Fließgewässers über eine (unrealistisch) große Anlage oder die Summe mehrerer kleiner Anlagen erschlossen wird. In der Planung konkreter Anlagen müssen somit gegebenenfalls bereits bestehende Nutzungen beachtet werden.

Zur Bestimmung der Deckungsgrade auf regionaler Ebene wird der Endenergieverbrauch der Anwendungen Raumwärme und Warmwasser in Relation zu den ausgewiesenen Wärmepotenzialen gesetzt. Der tatsächliche Bedarf an Nutzenergie ist aufgrund von Wirkungsgradverlusten, die heutzutage hauptsächlich durch die Verbrennung fossiler Energieträger resultieren, geringer als der zum Vergleich angesetzte Endenergiebedarf.

Auswirkungen aufgrund begrenzter Verfügbarkeit von Messungen

Im Rahmen der Potenzialanalyse in Kapitel 2.3.1 wird das thermische Potenzial betrachtet. Dabei wird eine Abkühlung ΔT jedes Fließgewässers angenommen. Das schließt auch über Zuflüsse eingetragene Wassermengen mit ein. Somit muss für eine möglichst präzise Annäherung des theoretischen Potenzials eines einzelnen Fließgewässers das Durchflussvolumen an der Mündung des Gewässers betrachtet werden. Hier ist also die Lage der Messstation von entscheidender Bedeutung. Ist diese weit von der Mündung entfernt,

wird (unter der Annahme, dass das Durchflussvolumen in Richtung flussabwärts zunimmt) die Durchflussmenge und somit das theoretische Potenzial in gewissem Maße unterschätzt. Aus diesem Grund wird bei Fließgewässern mit mehreren Messstellen diejenige gewählt, welche am weitesten flussabwärts gelegen ist, da anderweitig das Potenzial tendenziell unterschätzt wird. Bei etwa 57 % der betrachteten Fließgewässer steht lediglich die Messung einer einzelnen Station zur Verfügung. In diesen Fällen ist keine Auswahl aus mehreren Messstellen möglich.

Bei der Regionalisierung in Kapitel 2.3.3 wurde das zuvor ermittelte theoretische Potenzial jedes einzelnen Fließgewässers auf die Gemeinden entlang seines Verlaufs anteilig nach den Flusskilometern innerhalb der Gemeinden verteilt. Da sich die Durchflussmenge entlang eines Fließgewässers stetig ändert (i. d. R. nimmt diese in Fließrichtung zu), entstehen hier gewisse Ungenauigkeiten. Den Gemeinden, die weiter flussaufwärts gelegen sind, wird somit tendenziell zu viel Potenzial zugewiesen, da dort das Durchflussvolumen als geringer anzunehmen ist als bei Gemeinden, die sich weiter flussabwärts befinden. Beispielsweise könnte durch Interpolation der Messungen aller Stationen entlang eines Fließgewässers (sofern vorhanden) eine höhere Genauigkeit bei der Verteilung erreicht werden. Dieses Vorgehen sollte vor allem bei der Betrachtung einzelner Regionen oder Flüsse in Betracht gezogen werden. Die konsistente Anwendung einer derartigen Methode ist aufgrund der Tatsache, dass bei über der Hälfte der Fließgewässer nur eine Messstation vorhanden ist, nicht ohne weiteres möglich. Angesichts der Komplexität, die mit einer derartig detaillierten Vorgehensweise einhergeht und aufgrund der Zielsetzung einer ganzheitlichen Potenzialbewertung für Bayern, wird zur Vereinfachung nur eine Messstelle je Fließgewässer verwendet.

Berücksichtigung der Gewässertemperatur

Ein weiteres Kriterium, das grundsätzlich bei der Potenzialbewertung relevant ist, ist die Wassertemperatur. Ist diese zu gering, kann durch die Abkühlung des Gewässers an der Wärmepumpe Frostgefahr entstehen (siehe Kapitel 3.2.2). Darüber hinaus kann thermisches Potenzial durch natürliche Prozesse wieder zurückgewonnen werden, wodurch die wieder aufgenommene thermische Energie weiter flussabwärts ebenfalls zur Wärmerückgewinnung genutzt werden kann [16]. Diese Aspekte können beispielsweise durch Verschneidung der Messzeitreihen von Wassertemperatur und Durchflussvolumen in die Analyse einbezogen werden. Jedoch liegt für lediglich 125 der insgesamt 528 Messstellen mit Durchflussmessung eine zusätzliche Messung der Wassertemperatur vor. Somit

verringert sich die Zahl der Fließgewässer, die in die Analyse einbezogen werden können, noch deutlich mehr, als es durch fehlende Daten zum Durchfluss ohnehin der Fall ist (siehe oben). Aus diesem Grund wird die absolute Wassertemperatur im quantitativen Teil der Studie vereinfachend nicht berücksichtigt, sondern nur über die jeweils angenommene Temperaturspreizung angesetzt.

Limitationen bei der Ausweisung des Gesamtpotenzials

Bei der Potenzialbewertung wird jedes Fließgewässer individuell betrachtet. Interdependenzen zwischen den einzelnen Fließgewässern und deren Zuflüssen werden nicht berücksichtigt. Bei einer Potenzialbewertung unter der Bedingung, dass keines der Fließgewässer um mehr als die angenommene Temperaturspreizung ΔT abgekühlt werden soll, müssen diese Zusammenhänge berücksichtigt werden, da die Abkühlung eines Fließgewässers durch den Eintrag an der Mündung auch zu einer Abkühlung des nachfolgenden Fließgewässers führt. Dies setzt zusätzlich die Annahme voraus, dass das theoretische Potenzial der Zuflüsse bereits (vollständig) genutzt wird. Schließt man alle Fließgewässer aus, die vor der Messstelle in ein weiteres Fließgewässer münden, würde sich das gesamte theoretische Potenzial etwa um den Faktor 2 reduzieren. Da für eine exakte Betrachtung der Zuflüsse flächendeckend Messstationen an allen Mündungen vorhanden sein müssten, ist dieser Wert mit Ungenauigkeiten behaftet. Eine Wiedererwärmung des Gewässers durch natürliche Prozesse, welche diesen Effekt potenziell abmildert, wurde nicht berücksichtigt (siehe Abschnitt „Berücksichtigung der Gewässertemperatur“). Wie die Ergebnisse in Tabelle 2-1 belegen, ist der wesentliche Faktor die angenommene Temperaturabsenkung. Zwischen 0,5 und 3 K angenommener Temperaturspreizung ändert sich das resultierende theoretische Potenzial um Faktor 6. Daher spielt der o. g. Umstand bei einer ganzheitlichen Potenzialbewertung eine untergeordnete Rolle. Da die Abkühlung von Fließgewässern tendenziell jedoch eher positive Umweltwirkung hat und es aktuell in Bayern keine klaren gesetzlichen Grenzwerte hierfür gibt (siehe Kapitel 1.1, 3.2.2 und 3.2.4), werden diese Einschränkungen bei der Potenzialbewertung nicht berücksichtigt.

3 Rahmenbedingungen beim Einsatz von Wärmepumpen an Fließgewässern

3.1 Methodenbeschreibung

Im Zuge der Studie wurden vier Expert:innen-Interviews durchgeführt, um weitere Einblicke in die Rahmenbedingungen beim Einsatz von Wärmepumpen an Fließgewässern zu erhalten.

Mit dem Ziel, einen möglichst heterogenen Überblick über die Technologie zu erhalten, wurden verschiedene Interessensgruppen bei der Planung und Durchführung der Interviews berücksichtigt. Hierzu zählen zwei Anlagenbetreiber, ein Architektur- und Ingenieurbüro sowie ein Anlagenhersteller. Die Interviewpartner:innen und die zugehörigen Kürzel sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 3-1: Vorstellung der Interviewpartner:innen

Interviewkürzel	Interviewpartner:innen
EI-01	MVV Energie (Felix Hack)
EI-02	Stadtwerke Rosenheim GmbH & Co. KG
EI-03	Seiffert Architektur- und Ingenieurbüro (Dr. -Ing. Michael Seiffert)
EI-04	MAN Energy Solutions (Tobias Hirsch)

Die Interviews wurden digital durchgeführt und folgten einem einheitlichen Interviewleitfaden. Dieser wurde den Befragten vorab zur Einsichtnahme zur Verfügung gestellt.

Der Leitfaden beinhaltet allgemeine Informationen sowie vier inhaltliche Themenblöcke, die wiederum in weitere offene Haupt- und Unterfragen unterteilt wurden:

1. Technologie Status Quo
2. Randbedingungen, Einschränkungen und Hindernisse
3. Standortwahl und rechtlicher Rahmen
4. Chancen, Risiken und Ausblick

Insgesamt wurden so elf Hauptfragen und 13 Unterfragen behandelt. Die Schwerpunkte der einzelnen Interviews wurden in Abhängigkeit der fachlichen Expertise der Befragten leicht angepasst.

Die folgende Auswertung ist ähnlich dem Aufbau des Leitfadens gegliedert. Die jeweiligen Antworten wurden innerhalb der jeweiligen Themenblöcke und Hauptfragen miteinander verglichen, so dass sowohl übereinstimmende Aussagen als auch relevante Einzelaussagen dargestellt werden können.

3.2 Auswertung der Interviews

3.2.1 Technologie Status Quo

Stand der Technik

Bei den Befragten herrschte Einigkeit, dass die zugrunde liegende Technik sehr ausgereift ist. Dies zeigt sich unter anderem an den vielen Projekten, die derzeit in Planung oder Umsetzung sind [EI-04]. Auch die Erschließung von Fließgewässern ist durch bestehende Nutzungen zu Kühlzwecken erprobt [EI-01]. Im Vergleich zur Nutzung anderer Wärmequellen (z. B. Luft, Erdreich) sei die Nutzung von Fließgewässern noch eine Nischenerscheinung [EI-02]. Die Nutzung von Klärwasser ist aufgrund der höheren Temperaturniveaus weiter verbreitet [EI-04]. Es besteht jedoch noch Entwicklungspotenzial bei der Bereitstellung hoher Vorlauftemperaturen und großer Leistungsklassen [EI-01]. Auch bei der Nutzung von Kältemitteln (natürliche vs. synthetische) bestehen weitere Unsicherheiten [EI-01, EI-04].

Bei der Unterscheidung zwischen offenen und geschlossenen Systemen waren sich die Befragten einig, dass bei großen Leistungsklassen offene Systeme zu bevorzugen sind. Bei kleineren Anlagen sind geschlossene Systeme grundsätzlich denkbar. Maßgeblich für diese Unterscheidung sind die geringeren notwendigen Mengen an Kältemitteln, der geringere Verschmutzungsgrad sowie die leichtere Zugänglichkeit und Reinigung des Wärmetauschers bei offenen Systemen. In Bezug auf die Anlagensicherheit ist die Unterscheidung zwischen Systemen mit oder ohne Zwischenkreislauf relevant [EI-04]. Durch den zusätzlichen Wärmetauscher wird das nutzbare Temperaturniveau des Gewässers zwar reduziert, jedoch

können die notwendigen Mengen an Kältemittel reduziert und somit Vorteile hinsichtlich des Gewässerschutzes erzielt werden [EI-04].

Technologische Herausforderungen und Besonderheiten

Analog zum Stand der Technik wurden die technologischen Herausforderungen als gut beherrschbar bezeichnet. Diese liegen laut eines Experten eher in der Peripherie (z. B. leistungsfähige Lüftungsanlagen oder Absicherung durch Kältemitteldetektion) als in der Hauptanlagentechnik [EI-01]. Allerdings existieren aktuell kaum Standardlösungen, welche eine Planung vereinfachen könnten [EI-02].

Zu den bestehenden Herausforderungen zählen laut zweier weiterer Experten insbesondere der Schutz des Wärmetauschers vor Beschädigungen (durch z. B. Treibgut) und biologischem Bewuchs. Hierbei können entsprechende Rechenanlagen, die Zugänglichkeit für Reinigung und Wartung, Spülverfahren mit Heißwasser oder eine entsprechende Platzierung des Wärmetauschers bzw. des Entnahmebauwerks Abhilfe schaffen [EI-03, EI-04]. Bei der Nutzung von Rechenanlagen sollten laminare Strömungen möglichst vermieden werden, da diese die Funktion des Wärmetauschers negativ beeinflussen können [EI-03].

Die Vermeidung von Kältemittelleckagen ist ebenfalls als technologische Herausforderung anzuführen. Am konkreten Beispiel in Rosenheim wird dies durch einen Zwischenkreislauf mit Glykol erreicht. Dieser wird auf Leckagen überwacht und die Kreisläufe verwenden unterschiedliche Druckniveaus, um das Austreten des Kältemittels in das Fließgewässer zu verhindern. [EI-02]

3.2.2 Randbedingungen, Einschränkungen und Hindernisse

Gewässertemperatur und Temperaturabsenkung

Die Gewässertemperatur und die dadurch mögliche Temperaturabsenkung des Gesamtgewässers sowie des Entnahmestroms sind maßgeblich für den Betrieb von Wärmepumpen. Die möglichen und erlaubten Temperaturabsenkungen sind laut Aussagen der Befragten jedoch stark einzelfallabhängig, da keine allgemeingültigen Vorgaben existieren, sondern diese meist von den unteren Wasserbehörden vorgegeben werden.

Bei der Anlage in Mannheim variiert die Temperaturdifferenz des Entnahmestroms im Jahresverlauf zwischen 1,8 K und 3,8 K. Dadurch wird auch bei minimalen Eingangstemperaturen von 3 °C eine Austrittstemperatur von mindestens 1,2 °C

gewährleistet. Derart niedrige Wassertemperaturen seien im Rhein zwar selten, sind aber bereits diesen Winter (2023/2024) aufgetreten. Die Temperaturentwicklungen auf den Gesamtstrom des Rheins sind dabei vernachlässigbar, weshalb auch keine Auflagen für die Abkühlung existieren. [EI-01]

Auch bei der Anlage in Rosenheim gab es kaum bis keine Auflagen für die Abkühlung. Die Temperaturveränderung des Gesamtgewässers schwankt, bei gemeinsamer Nutzung für Kühl- und Heizzwecke, zwischen -0,5 K und 0,5 K. Im Regelbetrieb wird der Entnahmestrom um 6 K abgekühlt. Bei niedrigen Flusstemperaturen wird der Entnahmestrom bei doppeltem Durchfluss um 3 K abgekühlt. Die Anlage wird bei Wassertemperaturen unter 4 °C in Teillast betrieben und bei Temperaturen unter 3 °C abgeschaltet, um eine Rücklauftemperatur von mindestens 1 °C zu gewährleisten. Im ersten Winter führte dies zu zwei einwöchigen Stillständen und zwei Monaten Teillastbetrieb, da die Wassertemperaturen im Vergleich zum Rhein im Winter deutlich niedriger sind. Dies liegt daran, dass es sich um ein deutlich kleineres Gewässer in einer kälteren Region handelt. [EI-02]

Die Erfahrungen eines weiteren Experten zeigen, dass die erlaubte Temperaturabsenkung stark von der jeweiligen Genehmigungsbehörde abhängig ist. In mehreren Fällen waren jedoch 1 K Abkühlung des Gesamtgewässers möglich. Für die Planung ist jedoch die Mindesttemperatur des Gewässers entscheidend, da diese im Winter den Betrieb (vgl. Rosenheim) stark einschränken kann. Grundsätzlich kann dem Fließgewässer jedoch bis zu einer Wassertemperatur von 0,4 °C Wärme entzogen werden. Meist wird in der Planung der Entnahmestrom festgelegt und die Temperaturabsenkung dieses Teilstroms dann entsprechend angepasst, um die Grenzwerte für das Gesamtgewässer einzuhalten. [EI-03]

Laut eines weiteren Experten sind bei entsprechendem Volumenstrom viele Temperaturspreizungen denkbar, im Standardfall werden bei MAN Energy Solutions jedoch 2 K angesetzt. Um einen empfohlenen Abstand von 2 K zur Gefriergrenze einzuhalten, sind Gewässertemperaturen von 3 - 4 °C noch für eine sinnvolle Nutzung geeignet. In einem konkreten Anwendungsfall kann das einströmende Wasser bei sehr niedrigen Temperaturen über einen zusätzlichen Wärmetauscher durch den Rücklauf eines Wärmenetzes vorerwärmt werden, um den Betrieb der Anlage sicherzustellen und eine Vereisung zu verhindern. [EI-04]

Allgemein wurde jedoch klar hervorgehoben, dass die Gewässer tendenziell zu warm sind und eine Abkühlung daher positiv zu betrachten sei. [EI-03, EI-04]

Durchfluss der Gewässer

Ähnlich wie die Temperaturspreizung ist auch der an der Wärmepumpe nutzbare Volumenstrom stark einzelfall- und genehmigungsabhängig und im jahreszeitlichen Verlauf variabel. So kann dieser im Winter in einem gewissen Rahmen erhöht werden, um niedrigere Gewässertemperaturen auszugleichen. Dies muss jedoch bei der Auslegung der Wärmetauscherfläche und der Pumpenanlagen berücksichtigt werden und kann die Wirtschaftlichkeit beeinflussen. In Mannheim durchströmen im Standardfall 800 l/s den Wärmetauscher. Im Winter ist eine Steigerung auf bis zu 1000 l/s möglich [EI-01].

In Mannheim und Rosenheim existierten bereits Bestandsgenehmigungen für die anteilige Wasserentnahme aus dem Gesamtgewässer (max. 25 % bei Maximalstand in Rosenheim) [EI-01, EI-02]. Allgemein gültige Aussagen konnten im Zuge der Befragung hierzu nicht getroffen werden. Es ist bekannt, dass große Fließgewässer diesbezüglich weniger kritisch sind [EI-04].

Umweltauswirkungen und Gegenmaßnahmen

Als mögliche Umweltauswirkungen wurden vor allem der Fischschutz, Schallemissionen, Eingriffe in das Gewässer bzw. der Gewässerschutz im Allgemeinen sowie potenzielle Probleme hinsichtlich des Kältemittels genannt.

Um die Natur und das Gewässer zu schonen, sollten Synergien erzeugt und bereits vorhandene Bauwerke und Eingriffe, wie z. B. an (Wasser-)Kraftwerken, genutzt werden [EI-02, EI-03]. Durch geeignete Maßnahmen an Ein- und Auslaufbauwerken kann der Schutz der Fische sowie die Vermeidung von Sedimentatrag gewährleistet werden [EI-02, EI-04].

Hinsichtlich der Vorbeugung von Kältemittelleckagen wurden bereits wichtige Maßnahmen, wie die Nutzung von Zwischenkreisläufen oder die kontinuierliche Überwachung von Luft und Wasser, genannt. In Abhängigkeit der Kältemittelart und -menge können weiterhin besondere Vorkehrungen im Brand- und Explosionsschutz notwendig sein [EI-01].

3.2.3 Standortwahl und rechtlicher Rahmen

Geeignete Standorte

Wie bereits erwähnt, wurden vor allem Standorte in unmittelbarer Gewässernähe, an denen bereits Eingriffe in das Ökosystem und entsprechende

Entnahmebauwerke vorhanden sind, für den Einsatz von Flusswasser-Wärmepumpen als besonders geeignet identifiziert. Dies war auch bei den betrachteten Anlagen in Mannheim und Rosenheim der Fall. Solche Eingriffe oder bereits vorhandene große Wasserentnahmen sind unter anderem an Industrie- oder Kraftwerksstandorten, Mühlen, Wasserkraftanlagen oder Kanälen vorzufinden.

Insbesondere Stadtwerke betreiben oft Großkraftwerke in Flussnähe mit vorhandenen Wasserrechten, welche im Zuge der Dekarbonisierung ein Flächenpotenzial mit bereits vorhandener Infrastruktur und bestehender gesellschaftlicher und behördlicher Akzeptanz bieten [EI-04]. Ebenfalls vorteilhaft sind bereits vorhandene Anbindungen an das Fernwärme- und Stromnetz [EI-01]. Idealerweise sollten für eine genaue Standortwahl auch Analysen der Partikelfrachten des Fließgewässers durchgeführt werden, um Verunreinigungen und Reinigungsaufwand zu minimieren [EI-02].

Auf Nachfrage wurden neben den bereits erwähnten Standorten insbesondere bestehende Wasserkraft-Standorte als vielversprechend eingestuft [EI-01, EI-03, EI-04]. Als Gründe wurden hierfür neben den bestehenden Eingriffen in den Flussverlauf und der vorhandenen Infrastruktur insbesondere die sich durch Staustufen ergebende Resilienz gegenüber Niedrigwasser sowie die erneuerbare Stromerzeugung vor Ort angeführt [EI-01, EI-04]. Hierzu wurde in einem weiteren Gespräch erwähnt, dass die Eigenstromnutzung in vielen Fällen jedoch nicht ausreichend sein könnte [EI-02]. Dies zeigt das hohe Wärmepotenzial, welches an solchen Standorten erschlossen werden kann.

Bei der konkreten Standortwahl spielt neben der Wärmequelle auch die Wärmesenke eine wichtige Rolle, denn Wärmepumpen arbeiten umso effizienter, je geringer die benötigte Vorlauftemperatur ist [EI-01, EI-02, EI-03]. Hier sollten bei der Planung auch kalte Nahwärmenetze (Netze mit Temperaturen von 5 – 35 °C, die bei Einsatz zusätzlicher Haustechnik zu Heizzwecken nutzbar sind) berücksichtigt werden [EI-03]. Grundsätzlich lassen sich aber bei entsprechender Kältemittel- und Verdichter-Wahl nahezu alle Netztemperaturen bereitstellen [EI-04]. In Mannheim werden die von der Wärmepumpe bereitgestellten 99 °C bei Bedarf durch Dampfnacherhitzung auf die benötigten Netztemperaturen erhöht [EI-01]. Auch bei der Anlage in Rosenheim wird in der Heizperiode eine Nacherhitzung durchgeführt [EI-02].

Neben dem Neubau sollte auch explizit der Einsatz von Flusswasser-Wärmepumpen im Bestand

berücksichtigt werden. Dies gilt insbesondere für urbane Verdichtungsräume, in denen wenig Potenzial für anderweitige erneuerbare Wärmequellen besteht. [EI-03]

Rechtliche Rahmenbedingungen

Im Rahmen der Interviews wurde klargelegt, dass die Anlagen in Mannheim und Rosenheim als Nebenanlagen bestehender Kraftwerke bzw. auf Basis vorhandener Bestandsgenehmigungen errichtet wurden. Dadurch gibt es weniger zu beachtende Vorgaben und die anteilige Nutzung des Fließgewässers fällt im Verhältnis kaum ins Gewicht [EI-01, EI-02].

Im Allgemeinen sind laut der befragten Expert:innen insbesondere Gesetze und Verordnungen zum Wasserrecht (z. B. Wasserhaushaltsgesetz, Oberflächengewässerverordnung), Immissionsschutzrecht (z. B. Schallimmissionen) und Baurecht (z. B. Brandschutz, Explosionsschutz) sowie vorhandene Genehmigungsbescheide und Auflagen hinsichtlich der Nutzung von Kältemitteln (z. B. Störfallverordnung) zu beachten.

Die Anforderungen der Oberflächengewässerverordnung sind abhängig vom jeweiligen Fischbestand und beziehen sich ausschließlich auf die Erhöhung der Gewässertemperatur, nicht jedoch auf deren Absenkung [EI-03]. Es wurde außerdem erwähnt, dass diesbezügliche Regelungen für entsprechende Behörden oft Neuland und in Folge stark einzelfallabhängig sind. Daher ist es umso wichtiger, die positiven Auswirkungen der Gewässernutzung klar hervorzuheben. [EI-02]

3.2.4 Vor- und Nachteile, Ausblick

Vor- und Nachteile

Der Einsatz von Wärmepumpen an Fließgewässern bringt laut Einschätzungen der Befragten eine Vielzahl an Vorteilen. Hierzu zählen die Standardisierbarkeit und Robustheit der Technik, die Ermöglichung einer erneuerbaren und brennstofffreien Wärmeversorgung, die Umsetzbarkeit an einer Vielzahl von Standorten und die dabei entstehende lokale Wertschöpfung. Insbesondere im urbanen Raum stellen Fließgewässer eine wichtige und teils alternativlose Umweltwärmequelle dar.

Wie bereits erwähnt, wurde die Abkühlung der Gewässer in Zeiten der Klimaerwärmung als Vorteil bezeichnet, da diese tendenziell zu warm sind. Somit ist die Zuführung von kälterem, sauerstoffreicherem Wasser zu begrüßen [EI-03, EI-04]. Außerdem wurden die Möglichkeit der strommarktdienlichen Fahrweise und die potenzielle Entstehung neuer Geschäftsmodelle durch die Bereitstellung erschlossener Gewässereingriffe angemerkt [EI-03].

Auf Seiten möglicher Nachteile sind die notwendigen Redundanzen zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit, die (nicht vermeidbaren) Eingriffe in die Natur sowie die fehlende Standardisierung hinsichtlich der eingesetzten Kältemittel anzuführen. Außerdem seien Temperaturen von kleineren Fließgewässern im Winter kaum prognostizierbar und teilweise sehr niedrig, was wiederum zu Unsicherheiten bezüglich des Strombedarfs und der möglichen Wärmebereitstellung führt [EI-02]. Dies ist jedoch immer im Einzelfall zu betrachten.

Chancen und Risiken

Als Chancen für eine stärkere Umsetzung wurden v. a. die kommunale Wärmeplanung sowie schnellere Genehmigungsverfahren erwähnt. In Mannheim befinden sich bereits weitere Anlagen an Rhein und Neckar in Planung. Das thermische Entzugspotenzial für ganz Mannheim wird dabei überschlägig, analog zur bestehenden Anlage, auf bis zu 500 MW geschätzt, wobei das wirtschaftliche Potenzial vermutlich deutlich geringer ist. [EI-01]

Eine weitere Chance sei auch die Kombination mehrerer Wärmequellen. Dies wird derzeit in einem weiteren Teilprojekt im Rahmen der Reallabore erforscht. [EI-02]

In Bezug auf die Kombination mit anderen Wärmeerzeugern wurden in den Interviews keine klaren Präferenzen oder Hemmnisse festgestellt. Wie bereits in einem vorherigen Kapitel dargestellt, ist die Anlage in Rosenheim Teil eines iKWK-Systems [EI-02]. Ein weiterer Experte bezeichnete dies ebenfalls als sinnvolle Lösung [EI-03]. Grundsätzlich sind bei gegebener Redundanz viele Kombinationen denkbar.

Risiken werden aktuell v. a. in der Wirtschaftlichkeit, insbesondere gegenüber fossilen Alternativen, gesehen. Investitions- und Betriebskostenförderungen sowie stabile Strompreise werden hier zukünftig eine wichtige Rolle spielen [EI-01, EI-02]. Die Identifizierung der dafür notwendigen Rahmenbedingungen ist aktuell auch Teil der Reallabore [EI-02]. In diesem Zusammenhang wurde auch die zentrale Rolle des CO₂-Preises für die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu fossilen Alternativen mehrfach betont [EI-01, EI-04].

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Hinsichtlich der Hauptanlagentechnik wurde lediglich Entwicklungsbedarf in der Bereitstellung höherer Temperaturen [EI-01] sowie in der Langlebigkeit [EI-02] gesehen. Darüber hinaus sind produktionsseitige Standardisierungen erforderlich, um Skaleneffekte zu erzielen und somit Kosten zu senken [EI-01]. Auf der Forschungsseite könnten die Flexibilität der

Fahrweise und die Systemdienlichkeit intensiver untersucht werden [EI-01].

Entwicklungsbedarf wurde auch in der Optimierung der Netztemperaturen erkannt. Hierbei wurden sowohl die Reduzierung der Vorlauftemperaturen [EI-01] als auch die der Rücklauftemperaturen [EI-04] erwähnt, um die Effizienz der Wärmepumpen zu steigern.

Laut der Befragungen besteht auch bei Kältemitteln ein wichtiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Derzeit gibt es für große Leistungsklassen kaum Alternativen zu synthetischen Kältemitteln und wenn doch, bringen diese natürlichen Kältemittel andere Herausforderungen mit sich. Ein Experte hebt hierbei den Zielkonflikt zwischen der angestrebten Dekarbonisierung des Wärmesektors und der zunehmenden Einschränkungen bei den Kältemitteln (Zulassungen und Füllmengen) hervor [EI-04].

Empfehlungen an politische Entscheidungsträger:innen und Anwender:innen

Gerichtet an politische Entscheidungsträger:innen wurde eine Konkretisierung und Vereinheitlichung der Genehmigungsprozesse sowie der rechtlichen Rahmenbedingungen des Gewässerschutzes von allen Expert:innen als essenziell erachtet, um weniger behördenabhängige Entscheidungen zu ermöglichen. Dies ist insbesondere für die Abkühlvorgaben der unteren Wasserbehörden sowie für die Vorgaben zum Einsatz verschiedener Kältemittel entscheidend. In diesem Zuge sollte nach Meinung eines Experten auch die Einteilung der Wassergefährdungsklassen überdacht werden [EI-03].

Für eine weitere Verbreitung von Wärmepumpen an Fließgewässern muss laut der Befragten ebenfalls ein kontinuierlicher und stabiler wirtschaftlicher Rahmen geschaffen werden. Attraktive und stabile Strompreise sowie Förderungen sind derzeit entscheidend für den wirtschaftlichen Einsatz. Dabei wurde angemerkt, dass die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze ein attraktives Instrument darstellt, die Reichweite der bereitgestellten Mittel aufgrund der starken Überzeichnung jedoch unklar sei [EI-01, EI-04]. Deshalb sollte die grundlegende Struktur der Strompreise im Hinblick auf die anfallenden Abgaben und Umlagen analog zu anderen Nationen überarbeitet werden, um auch unabhängig von Förderungen eine langfristige Planung und einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen [EI-02]. Gleichzeitig sollten finanzielle Anreize für den netzdienlichen Betrieb von Wärmepumpen an Fließgewässern geschaffen werden [EI-03, EI-04].

Gerichtet an zukünftige Anwender:innen gilt es, Berührungsängste abzulegen, da die Technik ausgereift und nicht kompliziert ist [EI-02]. Die Nutzung von Fließgewässern als Wärmequelle für Wärmepumpen mache zukünftig für nahezu alle Städte und Stadtwerke Sinn, wobei neben großen Anlagen aber auch ausdrücklich Potenzial für kleinere Anlagen besteht [EI-03, EI-04]. Dabei sollten insbesondere bestehende Wasserrechte und Standorte (z. B. Industrie, Großkraftwerke, Wasserkraftanlagen) genutzt werden, um Synergien zu schaffen [EI-03]. Durch die Realisierung dieser „Quick-Wins“ kann die Thematik Schwung aufnehmen und mit der entsprechenden Akteurseinbindung und einer transparenten Berichterstattung dazu beitragen, Akzeptanz aufzubauen sowie weitere Projekte anzustoßen [EI-03].

4 Zusammenfassung

Wärmepumpen an Fließgewässern sind zukünftig (nicht nur in Bayern) eine vielversprechende erneuerbare Technologie zur Wärmeerzeugung. Insbesondere in urbanen Räumen mit wenig anderweitigen Wärmequellen ist ihre Bedeutung hoch. Die zugrundeliegende Wärmepumpen-Technik, welche zur Hebung des thermischen Potenzials der Fließgewässer notwendig ist, ist grundsätzlich ausgereift. Eine Standardisierung der Anlagen würde den Einsatz weiter befördern. Die Effizienz von Wärmepumpen an Fließgewässern und der damit einhergehende Bedarf an elektrischer Antriebsenergie ist stark von der notwendigen Differenz zwischen Gewässertemperatur und der Wärmesenke (z. B. Wärmenetz) abhängig. Folglich wurde in der Studie nur das thermische Potenzial der Fließgewässer betrachtet. In der Realität wird dieses thermische Potenzial noch um den aus der elektrischen Antriebsenergie resultierenden Wärmeanteil erhöht.

Das in dieser Studie ausgewiesene theoretische Potenzial von Wärmepumpen an Fließgewässern ist stark von der angenommenen Temperaturspreizung abhängig und bewegt sich zwischen knapp 60 und etwa 340 TWh pro Jahr. Auch wenn diese Werte teilweise höher sind als der bayerische Wärmebedarf für Raumwärme und Warmwasseraufbereitung ist eine vollständige Deckung aufgrund des saisonal gegenläufigen Verlaufs des Potenzials und der Nachfrage und regionaler Unterschiede nur bilanziell möglich. Insgesamt könnten nahezu ein Fünftel (19 %) der bayerischen Gemeinden ihren Wärmebedarf bei einer angenommenen Gewässerabkühlung von 1,5 K und bei vollständiger Ausschöpfung des theoretischen Potenzials ganzjährig decken. Gleichfalls gibt es jedoch Regionen, die aufgrund der fehlenden Verfügbarkeit von (ausreichend großen) Fließgewässern in dieser Studie kein bis kaum Potenzial aufweisen. Potenziale sind grundsätzlich jedoch an allen (auch kleineren) Gewässern vorhanden, konnten aber aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit nicht berücksichtigt werden. Hohe Deckungsgrade ergeben sich vor allem entlang der Donau und des Mains sowie in den Einzugsgebieten deren großer Zuflüsse.

Das theoretische Potenzial wird durch den nutzbaren Gewässerdurchfluss sowie durch die zulässige mögliche Temperaturabsenkung bestimmt. Je größer die mögliche Temperaturabsenkung und der nutzbare

Durchfluss ist, desto höher ist auch das dabei mögliche nutzbare Potenzial (linearer Zusammenhang). Allerdings existieren hierzu in Deutschland und auch in Bayern keine allgemeingültigen Vorgaben, die herangezogen werden können. Dies führt zu vielen einzelfallabhängigen Behördenentscheidungen, welche infolgedessen einen klaren Planrahmen erschweren. Aufgrund der zunehmenden Gewässertemperaturen im Zuge des Klimawandels sowie der Ergebnisse der Recherchen und Interviews dieser Studie ist anzunehmen, dass eine Abkühlung der bayerischen Fließgewässer in einem gewissen Rahmen – sowohl heute als auch zukünftig – als tendenziell ökologisch vorteilhaft zu betrachten ist. Die Frage, ob und wann eine Abkühlung als unkritisch und damit zulässig beurteilt werden kann, war nicht Teil dieser Studie. Hier erscheint eine Konkretisierung und Vereinheitlichung regulatorischer Rahmenbedingungen zukünftig sinnvoll.

Insbesondere im Winter können zu geringe Gewässertemperaturen das Potenzial limitieren, da sie zu Vereisungen am Wärmetauscher führen könnten. Betroffen hiervon sind vor allem kleine und in kalten Regionen gelegene Fließgewässer. Hier könnte gemäß der Interviews auch die Kombination mehrerer Wärmequellen Abhilfe schaffen. Dies ist bei der konkreten Anlagenplanung zu berücksichtigen.

Die Ausnutzung und die Erschließung des vorhandenen theoretischen Potenzials werden neben den regulatorischen Vorgaben insbesondere von den wirtschaftlichen Anforderungen beschränkt. Die Schaffung attraktiver wirtschaftlicher Rahmenbedingungen spielt somit eine essenzielle Rolle bei der (teilweisen) Ausschöpfung des Potenzials und der damit einhergehenden Verbreitung von Wärmepumpen an bayerischen Fließgewässern. Hierzu zählen laut der durchgeführten Expert:innen-Interviews einerseits ausreichende Förderungen für Investitions- und Betriebskosten, aber um eine langfristige Wirtschaftlichkeit auch ohne Förderung gegenüber fossilen Technologien zu ermöglichen, vor allem stabile und attraktive Strompreise und eine entsprechende CO₂-Preis-Gestaltung.

Zusätzlich werden bei der Nutzung von Fließgewässern unterschiedliche und teils widersprüchliche Interessen tangiert, was zu Problemen bei der Umsetzung

konkreter Anlagen führen kann. Hierbei sollten zunächst vor allem bestehende Gewässereingriffe (z. B. an Wasserkraftwerken oder Industriestandorten) genutzt werden, um durch Synergien die Umweltein-
griffe zu reduzieren, „Quick-Wins“ zu realisieren und dadurch Akzeptanz aufzubauen.

Wärmepumpen an Fließgewässern stellen somit eine vielversprechende Technologie dar, die grundsätzlich ausgereift, jedoch noch nicht ausreichend standardisiert ist. Die Flusslandschaft in Bayern bietet nach den Schätzungen dieser Studie in vielen Regionen großes (theoretisches) thermisches Potenzial. Wie hoch dieses letztendlich bewertet wird, hängt stark von der angenommenen Temperaturspreizung ab. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass ein wesentlicher Beitrag zur Deckung der Wärmenachfrage durch Wärmegewinnung aus Fließgewässern erzielt werden könnte. In der Einzelbetrachtung bei der Planung und Entwicklung konkreter Projekte wird das tatsächliche Potenzial zudem durch weitere unterschiedliche Faktoren, welche in der Gesamtpotenzialbewertung nicht eingeflossen sind, gegebenenfalls eingeschränkt. Allgemein betrachtet haben Fließgewässer-Wärmepumpen in Bayern das Potenzial, künftig einen bedeutsamen Beitrag zur Wärmeversorgung in einem dekarbonisierten Energiesystem zu leisten.

Literaturverzeichnis

- [1] Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland - Strategien für den Markthochlauf in Wärmenetzen und Industrie. Berlin: Agora Energiewende, 2023. DOI: 10.24406/publica-1440.
- [2] Reallabor der Energiewende: Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen. In <https://www.agfw.de/reallabor-gwp/>. (Abruf am 2024-03-01); Frankfurt am Main: AGFW, 2023.
- [3] R(h)ein mit der Wärme: MVV nimmt erste Flusswärmepumpe in Mannheim in Betrieb. In <https://www.mvv.de/ueber-uns/unternehmensgruppe/mvv-umwelt/aktuelle-projekte/mvv-flusswaermepumpe?category=0&question=1987>. (Abruf am 2024-03-12); Mannheim: MVV Energie AG, 2024.
- [4] Europas größte Wärmepumpe: Ausschreibung für den Anlagenbau startet. In https://www.rheinenergie.com/de/unternehmen/newsroom/nachrichten/news_71240.html. (Abruf am 2024-03-01); Köln: RheinEnergie AG, 2023.
- [5] Energie aus Bille und Elbe durch Flusswärmepumpen - Energiepark Tiefstack vollendet Kohleausstieg. In <https://www.hamburg.de/pressearchiv-fhh/16270922/2022-06-17-bukea-energiepark-tiefstack-kohleausstieg/>. (Abruf am 2024-03-01); Hamburg: hamburg.de, 2022.
- [6] Gaudard, Adrien: Thermische Nutzung von Oberflächengewässern - Mögliche physikalische und ökologische Auswirkungen der Wärme- und Kältenutzung. In: Aqua & Gas 97(5). Kastanienbaum, Schweiz: Eawag, 2017.
- [7] Gappisch, Jessika: Wärmeenergetische Leistungsfähigkeit ausgewählter Fließgewässer. Darmstadt: Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft - Technische Universität Darmstadt, 2017.
- [8] Janczura, Sarah: Fernwärme über die Flusswärmepumpe. In <https://www.vdi.de/news/detail/fernwaerme-ueber-die-flusswaermepumpe-in-deutschen-ballungszentren-oft-alternativlos>. (Abruf am 2024-3-14); Düsseldorf: VDI, 2023.
- [9] Schwinghammer, Florian: Thermische Nutzung von Oberflächengewässern. Freiburg i.Br.: Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., 2012.
- [10] Kammer, Henriette: Thermische Seewassernutzung in Deutschland - Bestandsanalyse, Potential und Hemmnisse seewasserbetriebener Wärmepumpen. Dissertation. Julius-Maximilians-Universität Würzburg. Herausgegeben durch Springer Vieweg: Wiesbaden, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-20901-8>.
- [11] Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (OGewV). Ausgefertigt am 2016-6-20, Version vom 2020-12-9; Berlin: Bundesministerium der Justiz (BMJ), 2020.
- [12] Merkblatt Nr.4.5/18 (Beurteilung von Wärmeleitungen). Ausgefertigt am 2023-1; Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2023.
- [13] Merkblatt Nr. 4.5/19 (Gewässerökologische Begutachtung von Wärmeleitungen). Ausgefertigt am 2023-1; Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2023.
- [14] Gewässerschutzverordnung (GSchV). Ausgefertigt am 1998-10-28; Bern: Schweizerischer Bundesrat, 1998.
- [15] Berger, Hannes: Wärmetauscher in oberirdischen Gewässern - Wasserwirtschaftliche Betrachtung. Deggendorf: Wasserwirtschaftsamt Deggendorf, 2011.
- [16] Gaudard, Adrien: Using lakes and rivers for extraction and disposal of heat: Estimate of regional potentials. In: Renewable Energy 134, S. 330-342. Kastanienbaum, Schweiz: Eawag, 2019. DOI: 10.1016/j.renene.2018.10.095.
- [17] Gaudard, Adrien: Thermische Nutzung von Seen und Flüssen - Potenzial der Schweizer Oberflächengewässer. In: Aqua & Gas 02/2018, S. 26-33. Kastanienbaum, Schweiz: Eawag, 2018.
- [18] Fink, Gabriel: Large lakes as sources and sinks of anthropogenic heat: Capacities and limits. In: Water Resources Research 50(9). Kastanienbaum, Schweiz: Eawag, 2014. DOI: 10.1002/2014WR015509.
- [19] Gaudard, Adrien: Impacts of using lakes and rivers for extraction and disposal of heat. In: WIREs Water 5(5). Kastanienbaum, Schweiz: Eawag, 2018. DOI: 10.1002/wat2.1295.
- [20] Huther, Heiko: Grüne Wärme aus dem Rhein. Von der Idee zur Planung der MVV-Flusswärmepumpe. In: AGFW-Veranstaltung SW.aktiv; Frankfurt a. M.: MVV Umwelt GmbH.

- [21] Siemens Energy (2023): Flusswärmepumpe beheizt tausende Haushalte.. In <https://www.siemens-energy.com/de/de/home/stories/mvv-mannheim.html>. (Abruf am 2024-03-12); München: Siemens Energy, 2024.
- [22] Hochmuth, Sebastian: Großwärmepumpen Rosenheim. Bau- und Betriebserfahrungen drei baugleicher Großwärmepumpen im Rahmen von iKWK-Systemen. In: AGFW-Veranstaltung SW.aktiv; Frankfurt a. M.: AGFW.
- [23] Reallabor der Energiewende GWP Großwärmepumpen in deutschen Fernwärmenetzen. In <https://www.energiwendebauen.de/projekt/neu-grosswaermepumpen-in-deutschen-fernwaermenetzen/>. (Abruf am 2024-01-12); Jülich: Projektträger Jülich | Forschungszentrum Jülich GmbH, 2024.
- [24] Erste von drei iKWK-Anlagen geht an den Start. In <https://www.swro.de/de/blog/ikwk-eroeffnung>. (Abruf am 2024-03-12); Rosenheim: Stadtwerke Rosenheim GmbH & Co. KG, 2024.
- [25] Das dritte der innovativen Kraft-Wärme-Kopplungssysteme nimmt seinen Betrieb auf. In <https://www.swro.de/de/blog/ikwk3-eroeffnung>. (Abruf am 2024-01-12); Rosenheim: Stadtwerke Rosenheim GmbH & Co. KG, 2024.
- [26] Ganal, Irina et al.: Entwicklung der Gebäudewärme und Rückkopplung mit dem Energiesystem in -95 % THG-Klimazielszenarien - Teilbericht. Kassel: Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik, 2019.
- [27] Guminski, Andrej: Bayernplan Energie 2040 - Wege zur Treibhausgasneutralität - Zusammenfassung. München: FfE, 2023.
- [28] Hamacher, Thomas et al.: Bewertung Masterplan Geothermie. München: Technische Universität München, 2020.
- [29] Aktuelle Lage Gasversorgung - Gasverbrauch Haushalts- und Gewerbekunden, monatlicher Mittelwert. In https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Gasversorgung/aktuelle_gasversorgung/_svg/GasverbrauchSLP_monatlich/Gasverbrauch_SLP_M_2023_2.html. (Abruf am 2024-02-02); Bonn: Bundesnetzagentur, 2024.
- [30] Schmid, Tobias: Dynamische und kleinräumige Modellierung der aktuellen und zukünftigen Energienachfrage und Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien. Dissertation. Herausgegeben durch Technische Universität München, geprüft von Prof. Wagner, Ulrich und Prof. Kolbe, Thomas H.: München, 2018.

