



Dossier: Wie viel Flusswärme ist tatsächlich nutzbar?

Zusammenfassung

Nach Auswertung von über 180 Quellen kommt der Autor zu folgendem Ergebnis.

- Werden alle Vorgaben betreffend bauliche Veränderungen in und an den Fließgewässern eingehalten, gibt es keine wesentlichen Vorbehalte nach Kriterien des Natur- und Umweltschutzes gegen die Nutzung von Flusswärme.
- Bei näherer Hinsicht ist insbesondere eine Beeinträchtigung der Fauna durch eine Absenkung der Flusswassertemperaturen durch die Wärmeentnahme nicht zu befürchten.
- Bei entsprechender Anpassung des Wärmebedarfs der zu versorgenden Wärmenetze an die lokal verfügbare Flusswärmemenge, kann eine Abdeckung des Jahresgesamt-Wärmebedarfs von ca. 90 % erreicht werden.
- Bei mit Flusswärme versorgten Wärmenetzen muss an eine Abdeckung von ca. 10 % der Spitzenlast durch andere Wärmequellen eingeplant werden.
- Als zukunftsichere Lösung für Spitzenlastabdeckung und Notfallüberbrückung bietet sich die Kombination der Flusswasserwärmepumpe(n) mit Power-to-Heat Kesseln und Wärmespeichern an. Was auch bezüglich der Investitionskosten die preisgünstigste Lösung ist.

Inhalt

Zusammenfassung	1
Was müsste geklärt werden?	3
Wie funktioniert ein Wärmenetz mit Flusswasserwärme?	3
Erfahrungen aus der Nutzung von Wärme aus Oberflächengewässern	4
Seit 1938 wird das Rathaus von Zürich aus der Limmat beheizt	4
Seit 1941 HALLENBAD ZÜRICH-CITY aus dem Schanzengraben	5
Seit 1942 WÄRMEPUMPE WALCHE für FERNWÄRMENETZ aus der Limmat	5
Erfahrungen der Seewärmenutzung lassen sich z. T. auch für Flusswärme nutzen	5
Flusswärmenutzung als selbstverständlicher Bestandteil der Wärmeplanung	5
In der Schweiz inzwischen selbstverständlich.....	5
Auch in den Niederlanden wird die Flusswärmenutzung entdeckt.....	6
Auch die Flusswärmenutzung in Deutschland nimmt Fahrt auf.....	7
Beeinträchtigt die Wärmeentnahme Flora und Fauna von Fließgewässern?	9
Beim Kühlwasser für Kraftwerke großzügig und bei Flusswärmepumpen übertrieben vorsichtig?	9
Naturschutz darf nicht zur Fortschreibung eines wenig erhaltenswerten Ist-Zustands werden!	9
Die deutschen Fließgewässer sind in einem ökologisch katastrophalen Zustand!.....	9
Die Wassertemperatur der Flüsse ist um bis zu 4 °C gestiegen	10
Der mit dem Temperaturanstieg sinkende Sauerstoffgehalt gefährdet die Flussfauna.....	10
Zusammenwirken von Eutrophierung, Temperaturanstieg und Sauerstoffschwund.....	11
Belastet das Abkühlen des Gewässers Fauna und Flora?.....	11
Schweiz und Bayern machen es vor, Flusswärme ohne Umweltscheuklappen	14
In der Schweiz einfache Regeln für Flusswärme bereits seit 2017.....	14

Bayerisches Landesamt für Umwelt 2025 erleichtert die Flusswärmenutzung	15
In Brandenburg konnte Flusswärme sogar im Naturschutzgebiet genutzt werden	16
Wie viel Wärme darf entnommen werden?	16
Rätselhafte 3 °C Grenze droht Flusswassernutzung einzuschränken	16
Von Flusswärmepumpen erzeugte Abkühlung bleibt im Rahmen der natürlichen Schwankungen	17
Bezüglich der Flusswasserabkühlung bestehen große Spielräume	18
Bei realistischer Einschätzung zeigt sich, die Flusswasserabkühlung ist nicht die Schranke	19
Wie viel Wärme kann entnommen werden?	19
Werden zu viele Flusswärmepumpen sich gegenseitig die Wärme wegnehmen?.....	19
Wann ist die Wiederaufwärmung des Gewässers eventuell zu gering?.....	20
Der Deckungsgrad eines Wärmenetzes aus Flusswärme ist sehr variabel	20
Der erreichbare Deckungsgrad hängt von den Vorgaben ab	21
Hessen: Flusswärme ist nur sehr begrenzt einsetzbar	21
Bayern: Es gibt erhebliche Potenziale	22
Die Entnahme- und Rückgabeebedingungen sind variabel.....	23
Wie heiß muss das Wärmenetz sein?	23
Wirtschaftliche Aspekte bei der Planung von Wärmenetzen mit Flusswärme	24
Bestehende fossile Verbrennungsanlagen werden durch Flusswärme ergänzt.....	24
Bestehende Biogasanlagen oder Holzverbrennung werden mit Flusswärme ergänzt	24
Neue Wärmenetze mit Kombination von Biomasse und Flusswärme werden zur Sackgasse	24
Wärmenetze nur bei dichter Bebauung und großer Anzahl angeschlossener Haushalte?	25
Generell sind auch für Flusswärmenetze vollelektrische Lösungen anzustreben	25
Vorteil: Die Investitionskosten sind bei vollelektrischen Anlagen vergleichsweise günstig	26
„Kleiner“ Haken: Betriebskosten hängen vom Strompreis ab	26
Danksagung	26
Quellen	27

Unter Experten herrscht Einigkeit, CO₂-freie Gebäudewärme kann langfristig ausschließlich nur noch durch die Kombination von Umweltwärme und Abwärme mit grünem Strom bereitgestellt werden. Für dichter besiedelte Flächen erscheinen Wärmenetze als effizienteste Lösung, wie ja das Beispiel Dänemark zeigt. Als natürliche Wärmequellen sind Tiefe, Mitteltiefe und Oberflächennahe Geothermie zwar bezüglich des dafür benötigten elektrischen Energieaufwands am effizientesten, aber sie erfordern relativ hohe Investitionen in die Erschließung der Wärmequellen. Die Nutzung von Luftwärme ist für größere Wärmenetze technisch (große Wärmetauscherflächen) sehr aufwändig und speziell in kalten Wintern energetisch zu ineffizient. Auch Solarthermie in Kombination mit Saisonspeichern hat sehr großen verbrauchsnahe Flächenbedarf und erfordert hohe Investitionen. Deshalb wird derzeit mit einer gewissen Euphorie die Nutzung von Oberflächengewässern speziell von Flusswärme propagiert, denn hier erfordert die Wärmenahme i. d. R. wesentlich geringeren Aufwand als die Erschließung von Erdwärme mittels Bohrungen. So kam 2024 eine Studie von Seidel und Ostermann (TU Braunschweig) zum Ergebnis, dass allein in den 80 deutschen Großstädte ca. 2/3 der Gebäudewärme mit Flusswärme abgedeckt werden könnte [1]. Die Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FFE) kommt für Bayern in 2024 sogar zum Ergebnis, dass in Gebieten mit geeigneten Gewässern bis zu 85 % des Heizenergiebedarfs (auch in den Wintermonaten) durch Flusswärme abgedeckt werden könne [4]. Doch andererseits zeigt sich, dass bei Anwendung der derzeit in Deutschland üblichen Berechnungsmethoden die Flüsse an ca. 20 – 100 Wintertagen – also gerade dann, wenn der Heizwärmebedarf am höchsten ist – viel zu wenig nutzbare Wärme liefern [2, 3, 5]. So dass bei der Wärmeplanung vieler Kommunen die

Nutzung der Flusswärme derzeit noch aus der Planung fällt. Auch von Seiten des Naturschutzes gibt es zurecht Bedenken, ob die Entnahme und Rückführung des abgekühlten Flusswassers nicht zu Schäden an Flora und Fauna der Gewässer führen könne. Anlass die Nutzung von Flusswärme für Wärmenetze einmal interessenneutral nachzuerforschen.

[weitere für diesen Absatz verwendete Quellen: 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 162, 180, 181, 182, 183, 184]

Was müsste geklärt werden?

Beeinträchtigung von Natur und Umwelt:

- Schäden für Fische, Eier, Larven und Kleinstlebewesen verursacht durch das Ansaugen und Durchziehen des Wassers durch ein Rohrsystem.
- Eventueller Chemikalieneintrag durch Systemreinigung oder technische Defekte (Unfälle).
- Belastung des Gewässers bei Defekten der Wärmepumpe bzw. des Wärmetauschers durch Austreten des Arbeits- bzw. Kältemittels.
- Belastung der Fauna (speziell auch der Fische) und Flora durch Abkühlen des Gewässers.

Bei der Aufstellung dieser Kriterien wurde die LAWA-Studie LFP 2023, Projekt O 5.23 berücksichtigt und insbesondere auch eine persönliche Anfrage an die S4F aus den Kreisen besorgter Gewässerschützer. [15, 16]

Entnehmbare Wärmemenge und nutzbarer Zeitraum:

- Berücksichtigen die derzeitigen Abschätzungsmethoden tatsächlich alle Eigenheiten des Temperaturverlaufs bei der Wärmeentnahme aus Fließgewässern?
- Wie weit sind die bisherigen Ergebnisse der Abschätzung entnehmbarer Wärmemengen von ungenügend hinterfragten Vorgaben bestimmt? Das betrifft vor allem die entnehmbare Wassermenge, die Temperaturabsenkung des entnommenen Wassers, bis zu welcher Flusswassertemperatur Wasser entnommen werden darf und dann die Vorlauftemperatur im Wärmenetz.
- Und bis zu welcher Untergrenze der Flusswassertemperatur ist die Wärmeentnahme noch ausreichend und effizient genug?
- Werden neuere Verfahren, wie z. B. die wesentlich effizientere Flüssigeistechnologie, bereits berücksichtigt?

Wie funktioniert ein Wärmenetz mit Flusswasserwärme?

Für Quartiersnetze oder größere Wärmenetze wird dem Fluss in geeigneter Tiefe Wasser entnommen. Dieses Wasser wird durch einen Wärmetauscher gepumpt. Die abgegebene Wärme wird dann mittels einer Groß-Wärmepumpe auf – je nach Wärmenetz – 65 °C bis 90 °C angehoben und in das die Häuser versorgende Wärmeleitungsnetz eingespeist.

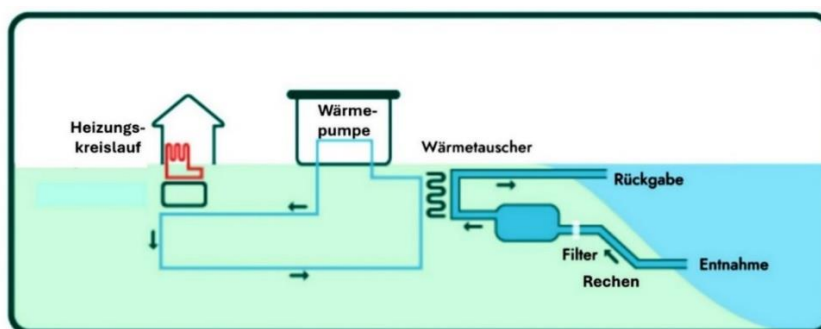


Abbildung: BfLquelle: <http://www.gewasser-technik.de>

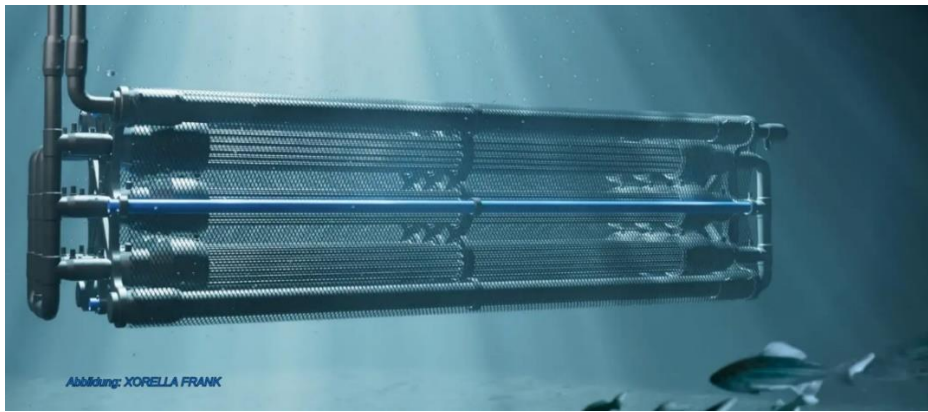


Abbildung: XORELLA FRANK

Für kleine Wärmenetze kann der Wärmetauscher auch direkt in den Fluss gelegt werden.

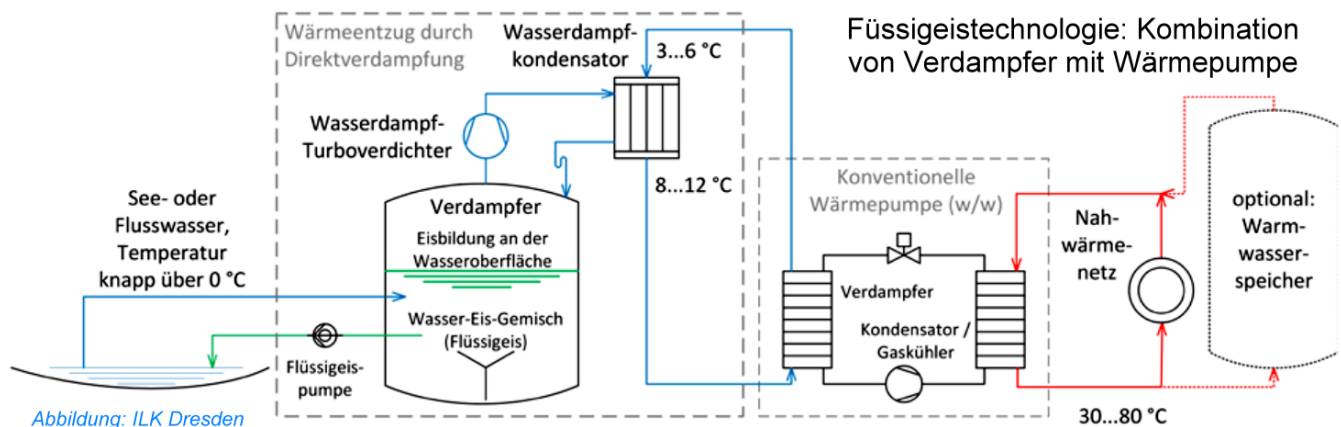


Abbildung: ILK Dresden

Das Flüssigeisverfahren entnimmt das Flusswasser direkt, unterzieht es aber einem zweistufigen Prozess, bei dem eine Verdampfungsstufe der Wärmepumpe vorgeschaltet ist. [17]

Ob es durch Leckagen im Wärmepumpenkreislauf bzw. im Flusswärmetauscher zu Gefahren für Flora und Fauna im Fluss kommen kann, hängt von den verwendeten Arbeitsmitteln ab. Im Detail wird dies in diesem Dossier im Kapitel zur Umweltverträglichkeit geklärt.

Erfahrungen aus der Nutzung von Wärme aus Oberflächengewässern

Angesichts dessen, dass z. B. in der Schweiz die Wärme aus Seen und Flüssen bereits seit Jahrzehnten zum Heizen genutzt wird, verwundert es, dass in Deutschland noch kaum auf diese Erfahrungen zurückgegriffen wird. Aber auch in Deutschland gibt es bereits erfolgreiche Projekte, so dass ohne zusätzlichen „Forschungs- und Entwicklungsaufwand“ das Rad nicht neu erfunden werden müsste. Nachfolgend nun einige ausgewählte exemplarische Beispiele.

Seit 1938 wird das Rathaus von Zürich aus der Limmat beheizt

Das bekannteste Beispiel ist die 1938 erbaute erste Wärmepumpenanlage im Züricher Rathaus. Die Wärmeenergie wird aus dem Fluss Limmat entnommen. Die Leistung von 100 kW reicht für die ausschließliche Beheizung mit Flusswärme auch im strengsten Winter. Nach 63 Vollbetriebsjahren wurde die noch immer voll intakte historische Wärmepumpe im Jahr 2001 durch eine effizientere moderne Wärmepumpe ersetzt. Diese erreicht mit dem Kältemittel R-134a (Tetrafluorethan) bei einer Flusstemperatur von 3,5 °C und einer Heizungsvorlauftemperatur von 55 °C eine Wärmeleistung von 134 kW und einen COP von 3,3. Da die Limmat aus dem Ablauf der Seeoberfläche des Zürichsees gespeist wird, liegt in strengen Wintern die Flusstemperatur um 3 °C. Auch dann reicht die Flusswärme zur Beheizung des Rathauses aus. Als Notreserve bei Ausfall der Wärmepumpe sind mobile Heizcontainer eingeplant, die nach aktuellem Stand wohl mit Strom (Power-to-Heat) betrieben würden. Was aber wohl nie nötig sein wird, da die historische Wärmepumpe noch immer einsatzbereit wäre. [6, 7]

Seit 1941 HALLENBAD ZÜRICH-CITY aus dem Schanzengraben

Auch der Schanzengraben ist ein Abfluss des Zürichsees und unterliegt ähnlichen Temperaturschwankungen wie die Limmat. Ursprünglich wurde für das Badewasser eine Wärmepumpe mit 325 kW und für die Gebäudeheizung eine weitere Wärmepumpe mit 700 kW Leistung eingesetzt. In 1980 wurde dann als Ersatz eine neue 1,2 MW Wärmepumpe installiert. Diese erwies sich jedoch als überdimensioniert bzw. unwirtschaftlich. Seit 1996 werden deshalb 2 Wärmepumpen mit 325 kW bzw. 100 kW Leistung in Kombination mit einem 500 kW Spitzenlast-Heizkessel eingesetzt. **Hinweis:** Die Wärmepumpe wurde 1996 mit dem Heizkessel kombiniert, da damals die Preise für fossile Energieträger im Vergleich den Stromkosten günstiger waren. Heute empfiehlt der Kanton Zürich für alle neuen bzw. zu erneuernde Heizungen vollelektrischen Betrieb. [7]

Seit 1942 WÄRMEPUMPE WALCHE für FERNWÄRMENETZ aus der Limmat

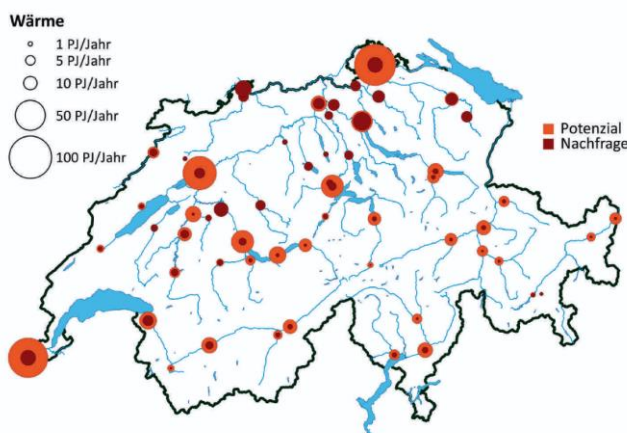
Um vom Export fossiler Energie (damals Kohle) unabhängig zu werden, wurde 1942 eine Energiezentrale an der Limmat gebaut, die bis zu 5,8 MW Flusswärme in das Fernwärmenetz der Stadt Zürich einspeiste. 1972 wurde die Anlage wegen der niederen Heizölpreise eingestellt, aber seit 1986 mit neuen Wärmepumpen wieder aufgenommen. Mit einer Gesamtleistung von 13 MW (im strengsten Wintertagen immer noch 10 MW) werden ca. 25 % des derzeitigen Wärmebedarfs des Züricher Fernwärmenetzes abgedeckt. 75 % stammen derzeit noch aus Müll- und Holzverbrennung. Da sich die Stadt Zürich der Begrenztheit dieser Ressourcen bewusst ist, soll bis 2040 ein auf fast doppelte Größe ausgebautes Fernwärmenetz, neben Müllverbrennung, Abfallwärme aus der Industrie und Abwasserwärme sowie Nutzung des Uferfiltrats der Limmat, weitestgehend mit Seewärme versorgt werden. Grundlage sind die über Jahrzehnte positiven Erfahrungen mit der Flusswärmenutzung. [7, 42]

Erfahrungen der Seewärmenutzung lassen sich z. T. auch für Flusswärme nutzen

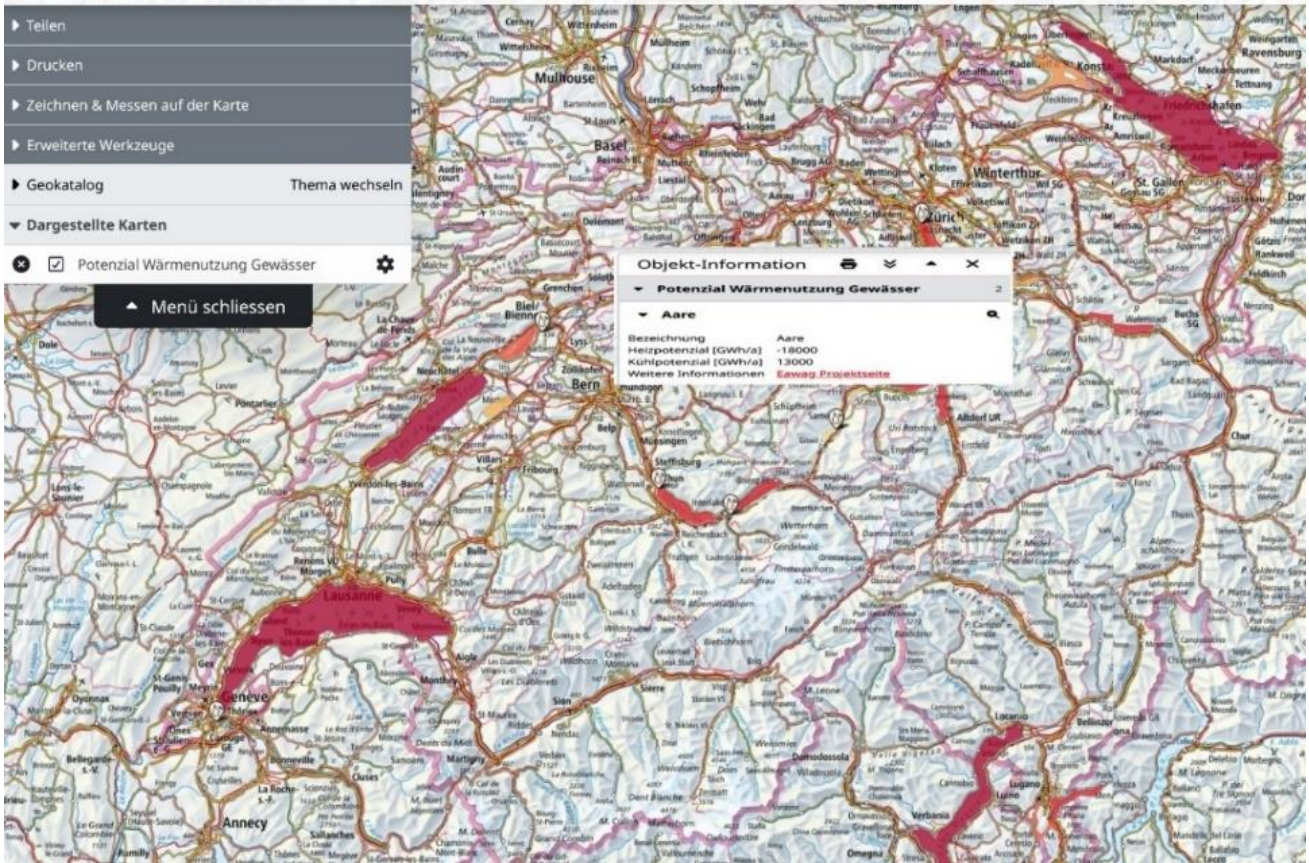
Die direkte Nutzung von Seewärme, wo das Wasser in bis zu 40 m Tiefe mit konstant 8 °C entnommen werden kann, bietet wegen des hohen COP besondere Vorteile und wurde (Vierwaldstättersee, Bielersee) oder wird in der Schweiz vielerorts genutzt werden (z. B. Bodensee, Zugersee). Was die Problematik des Umwelt- bzw. des Wasserschutzes betrifft, können die Erfahrungen z. T. auch auf die Nutzung von Flusswärme übertragen werden. [18, 19]

Flusswärmenutzung als selbstverständlicher Bestandteil der Wärmeplanung

In der Schweiz inzwischen selbstverständlich



Bereits 2017 legte das BFE eine Studie zur thermischen Nutzung von Oberflächengewässern vor [46]. Weitere Studien folgten 2021 und 2023 [44, 45]. Eine Analyse von Gaudard et al. zeigte bereits 2018, dass das Potenzial an Flusswärme in der Schweiz praktisch überall den Bedarf übertrifft [29]. Inzwischen wird die Nutzung von Flusswärme von der Schweizer Bundesregierung als selbstverständlich betrachtet und das Bundesamt für Energie (BFE) der Schweiz stellt in Kooperation mit dem eawag (Wasserforschungsinstitut der ETH Zürich) eine interaktive Karte zur Verfügung. Zu jedem Standort können hier die Potenziale für Wärme und Kühlung mit Fluss- oder Seewasser abgerufen werden. Zum Beispiel für die Aare in Bern. [21, 22]



Auch eine vom Kanton Thurgau bereits in 2021 beauftragte Machbarkeitsstudie „*Thermische Nutzung Bodensee und Rhein*“ schlägt die Nutzung von Fluss- und Seewärme für 14 Wärmenetze des Kantons vor. [19]

Auch in den Niederlanden wird die Flusswärmenutzung entdeckt

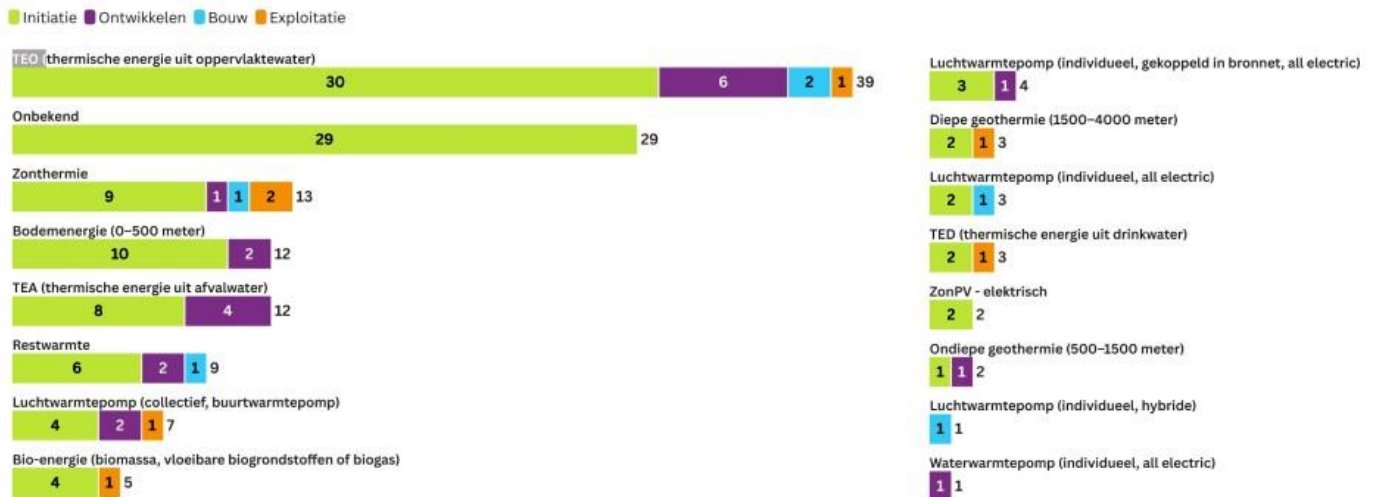


Abbildung: HIER NL

Von insgesamt 106 Bürger-Wärmenetzen in den Niederlanden spielt in 39 Fällen die Gewinnung von Wärme aus Oberflächenwasser die größte Rolle. [23]

Auch die Flusswärmenutzung in Deutschland nimmt Fahrt auf

Das sind nicht nur kleine Anlagen wie z. B. an der Murg [43]. Eine Marktanalyse zu Aquathermiesystemen im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie dokumentiert Beispiele der Fluss- und See-wassernutzung am Hainer See, in Wittenberge, Eschweiler, Lemgo, Zittau und Feldberg [188]. Nachfolgend nun eine Auswahl verwirklichter und geplanter Anlagen in Deutschland, die die Grenzen und Schwierigkeiten aber vor allem auch die Möglichkeiten exemplarisch illustriert.

Anlage mit Nutzung des Rheins in Mannheim

Diese Anlage nutzt bereits seit Oktober 2023 in Mannheim den Rhein als Wärmequelle der Fernwärmeversorgung für ca. 3500 Haushalte mit einer großen Wärmepumpe (20 MW thermisch, 7 MW elektrisch). Der Rhein der im Sommer bis zu 25 °C warm wird, bleibt auch im Winter über 5 °C. So kann mit einer Abkühlung des entnommenen (!) Flusswasser um 2 K bis 5 K auch im Winter genug Wärme entnommen werden. (Entnahmemenge: 60 m³/s, Abkühlung $\Delta T = 1,8 - 3,8$ K, minimale Rückführtemperatur: 1,2 °C). Die Anlage ist so erfolgreich, dass mit einer **neuen Flusswärmeanlage mit 165 MW** die bisherige Einspeisung fossiler Abwärme aus einem Kohlekraftwerk ins Fernwärmenetz weitgehend ersetzt werden wird. Ab Herbst 2028 sollen damit dann 40.000 Haushalte versorgt werden. [4, 24]

Hinweis: Der relativ günstigen Grundinvestition für die Flusswärmeanlage stehen im Vergleich zu einer Erdsondenlösung oder gar tiefer Geothermie allerdings zusätzliche Betriebskosten für die regelmäßige Reinigung der Ansauganlage gegenüber. Was Flusswärme nicht ungünstiger macht, aber den Kostenvorteil schmälert.

Rosenheim Anlage am Mühlbach

Sie nutzt mit dem Mühlbach einen Nebenarm des Inn und kann mit der entnommenen Wärme von max. 4,5 MW ca. 890 Haushalte versorgen.

Besonderheit ist jedoch, dass die Einspeisung in ein 85 °C Fernwärmenetz erfolgt, dass bislang zu 90 % aus einem Müllheizkraftwerk und einem Gaskraftwerk versorgt wird. D. h. bei Einspeisung in ein 65 °C Wärmenetz könnte wegen des besseren COP bei gleichem Stromverbrauch ein wesentlich größerer Anteil des Wärmebedarfs mit Flusswärme abgedeckt werden.

Hinweis zu den Investitionskosten: Der Autor recherchierte bei Erdsonden-Bohrfirmen. Es zeigte sich, dass die Grundinvestition in eine Anlage gleicher Wärmeleistung mit Erdwärme ca. 4 Mio. Euro teurer gewesen wäre.

Wärmepumpe	Johnson Controls SaBROE/NS-DualPAC
Wärmequelle	Flusswasser (Mühlbach), gereicht und gesiebt, Entnahmestrom für jede Wärmepumpe: 40 l/s, Abkühlung des Entnahmestroms: $\Delta T = 3-6$ K, Minimale Rückführtemperatur: 1 °C, Temperaturveränderung des Gesamtflusses durch Wärmepumpenbetrieb: max. 0,5 K
Thermische Leistung	3 mal 1.566 kW
Elektrische Leistung	3 x 628 kW (Lastbereich: 40–100 Prozent)
Vorlauftemperatur	88 °C
Kältemittel	R717 (Ammoniak, natürliches Kältemittel), ca. 3 x 260 kg
Gewicht	Ca. 19 t je Wärmepumpe
Geplante Betriebsstunden	Ca. 4.500 h p.a.
COP	2,5 bis 2,8
Investitionsvolumen	3,8 Mio. € (Wärmepumpen), 8,5 Mio. € (inkl. Gebäude u. Anbindung)
Inbetriebnahme	Juni 2022

Abbildung: Leitfaden – Eine Einführung in die Wärmegewinnung aus Flusswasser auf Basis Forschungsstelle für Energiewirtschaft (2024)

[Quellen zu Rosenheim: 4, 14, 25, 1, 26,27]

Überseeinsel in Bremen

Hier wird seit Mai 2025 der Weser auf der Überseeinsel 5 MW Heizleistung für ca. 600 Haushalte und 70.000 Quadratmeter Gewerbefläche entzogen. Besonderheit ist der Einsatz der **Flüssigeistechnologie**, die auch noch bei

tiefen Wassertemperaturen bis 0,1 °C den Entzug großer Wärmemengen erlaubt. Zukunftsweisend ist auch die **Kombination mit Wärmespeichern**, die bei Stromausfall oder Wärmepumpendefekt Überbrückungen von bis zu 72 h erlauben. Darüber hinaus kann mittels eines 1 MW **Power-to-Heat Kessel** auch noch billiger Überschussstrom genutzt werden. Da das Flüssigeis in die Wesermündung eingeleitet wird, werden die sonst propagierten Temperaturgrenzen des Naturschutzes ignoriert.

Ausblick: Inzwischen ist geplant, die Versorgung durch Flusswärme in Bremen auf bis zu 100.000 Haushalte auszuweiten. [Quellen zu Bremen: 28, 29, 30, 31, 1]

Hannover Wärmegegewinnung aus Flusswasser der Leine

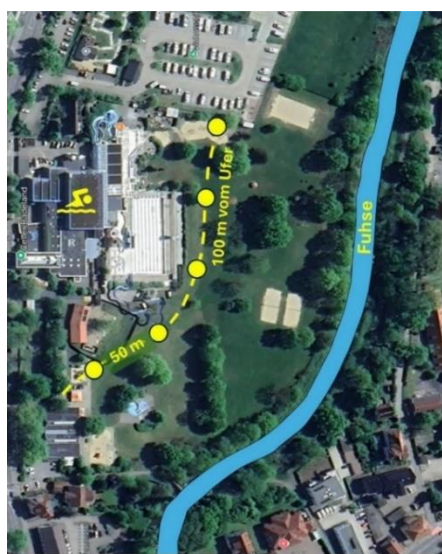
Die Hauptwärmequellen für das Fernwärmenetz in Hannover mit bisher ca. 1.200 GWh/a waren bislang das Kohlekraftwerk Stöcken und das Erdgas-Heizkraftwerk Linden, ergänzt durch die Müllverbrennungsanlage in Lahe. Jetzt wird an Stelle eines schon länger stillgelegten Kohlekraftwerks eine Flusswärmepumpenanlage mit insgesamt 60 MW Leistung gebaut, die ca. 15 % des derzeitigen Wärmebedarfs des Gesamtnetzes von ca. 1.400 GWh/a abdeckt.

Besonderheit nur Mittellastabdeckung: Da die Wärme mit ca. 95 °C in ein Wärmenetz relativ hoher Temperatur eingespeist wird, wird die Anlage mit ca. 4000 h/a nur zur Mittellastabdeckung betrieben. Im Sommer wird die Grundlast durch die Müllverbrennungsanlage, die Klärschlammverbrennungsanlage und die in Planung befindliche Geothermieanlage gedeckt werden. Im Winter wird die Spitzenlast durch Biogas und Altholzverbrennungsanlagen sowie Power-to-heat Anlagen mit insgesamt 110 MW Leistung abgedeckt. [1, 10, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37]

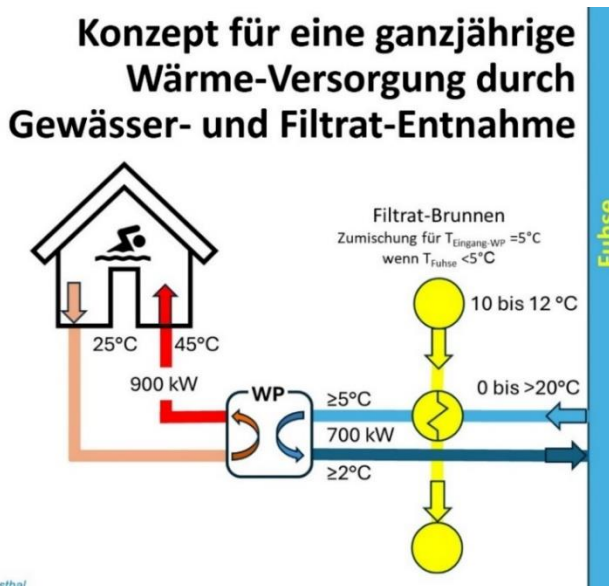
Hinweis: Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass in ca. 15 Jahren weder Erdgas und voraussichtlich auch nicht genug bezahlbares Holz* und Biogas zur Verfügung stehen werden und auch Wasserstoff zu teuer sein wird. Also letztlich wird, wie der Schweiz, der Trend auch in Hannover zu vollelektrischer Umweltwärmenutzung gehen müssen. (* Enercity hat in Hannover Stöcken 2025 ein Holzheizkraftwerk – 90 MW thermisch und 20 MW elektrisch – in Betrieb genommen. Es wird ausschließlich mit Altholz aus angeblich 150 km Umkreis versorgt. Allerdings ist das Altholz, das bislang bereits andernorts unter Strom- und Wärmegegewinnung genutzt wurde. Das heißt, dieses Altholzkraftwerk der Enercity in Hannover wird die Konkurrenz um Altholz weiter anheizen. Wobei sich die Preise für mit Schadstoffen unbelastetes Altholz in den letzten 10 Jahren bereits verdoppelt haben. Unrealistischerweise wird Altholzverbrennung immer noch in vielen kommunalen Wärmeplanungen eingeplant.) [38, 39, 40]

Projektvorschlag für die Nutzung von Flusswasserwärme plus Uferfiltrat für das Celler Badeland

Dieser Projektvorschlag ist insofern interessant, da er ausschließlich mit Umweltwärme auskommt.



Quelle: Prof. Kurt Reinicke, Institute of Subsurface Energy Systems der TU Clausthal



Der max. Umweltwärmebedarf beträgt $Q_{th} = 700 \text{ kW}$; Für $Q_{th} = 700 \text{ kW}$ ist nach $Q_{th} [kW] = (\dot{V} * \rho_{wasser}) * c_p * \Delta T$; mit $c_p = 4,2 \text{ kJ}/(\text{kg K})$, $\rho_{wasser} = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ und $\Delta T = 3 \text{ K}$ ist ein **Volumenfluss = 0,056 m³/s bzw. 200 m³/h** erforderlich.

$T_{\text{Fuhse}}, \text{ }^\circ\text{C}$	7	5	0
ΔT_{WP}	5	3	3
$Q_{\text{Fuhse}}, \text{ m}^3/\text{h}$	120	200	75
$Q_{\text{Filtrat}}, \text{ m}^3/\text{h}$	-	-	125

Das heißt, je nach Temperatur des Fuhsewassers kann der Restbedarf an Wärme aus dem Uferfiltrat gewonnen werden. Als Notreserve bei Ausfall der Wärmepumpen könnte ein Power-to-Heat-Kessel dienen.

Quelle: Präsentation Reinicke ITE TU Clausthal [41]

Beeinträchtigt die Wärmeentnahme Flora und Fauna von Fließgewässern?

Diese Frage muss zu Recht gestellt und unbedingt geklärt werden, damit sich die Ignorierung ökologischer Gesichtspunkte, wie bei der der Nutzung von Fließgewässern zur Kühlung von Kraftwerken, nicht wiederholt.

Beim Kühlwasser für Kraftwerke großzügig und bei Flusswärmepumpen übertrieben vorsichtig?

Erst in den 1970-er Jahren wurde begonnen, die Einleitung erwärmter Kühlwässer aus Kraftwerken zunehmend zu regulieren und zu begrenzen. Wobei die Vorschrift, Kühltürme zu nutzen, zwar die Einleitungstemperaturen senkte, aber den Flüssen ein Teil des Kühlwassers durch Verdampfung entzogen wurde. Die Genehmigungsverfahren für die Wasserentnahme und Rückleitung von AKW und Kohlekraftwerken zeigen bis in die jüngste Vergangenheit, dass die dafür angelegten Kriterien und Genehmigungen doch recht großzügig sind und waren. So soll(te) die Temperatur des Gewässers nach der Durchmischung mit dem Kühlwasser in sommerwarmen Gewässern meist (!) nicht über der „kurzfristig tragbaren“ Spitzentemperatur von 28 °C liegen. Doch dieser hohe Wert gilt nicht mal universell, sondern hängt von der wasserrechtlichen Erlaubnis der zuständigen Behörde ab, die im Einzelfall prüft, „wie viel Abwärme der betroffene Fluss oder See verträgt“. Wobei man wissen muss, dass eine Flusswassertemperatur von 28 °C für viele heimische Fische und Krebse kritisch bis tödlich sein kann. [47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 155]

Naturschutz darf nicht zur Fortschreibung eines wenig erhaltenswerten Ist-Zustands werden!

Ganz gleich ob sich der Mensch bei der Nutzung der Natur an die Umwelt anpasst oder ob er die Umwelt verändert und gestaltet, er bleibt stets abhängig von den Naturgesetzen. Diese kann er allerdings so einsetzen, dass er die Umwelt so stark verändert, dass sie als Lebensgrundlage für ihn selbst und viele Lebewesen ausfällt. Dieser zerstörerische Prozess ist inzwischen defacto soweit fortgeschritten, dass z. B. Mikroplastik oder PFA ausnahmslos weltweit anzutreffen sind, ob Antarktis oder Himalaya [57, 58, 59]. Und auch die vom Menschen verursachten Treibhausgase lassen die Temperaturen weltweit ansteigen. Diese vom Menschen verursachten Missstände erfolgen nicht „gegen die Naturgesetze“, sondern sind Folge vom Menschen ausgelöster naturgesetzlicher Abläufe. Statt nun unter dem Paradigma des Erhalts einer angeblich „natürlichen Natur“ jeden (weiteren) Eingriff in die Umwelt abzulehnen, wird es höchste Zeit, so einzugreifen, dass unsere Umwelt als Lebensgrundlage für alle Lebewesen erhalten bleibt. Statt jeden Eingriff in die „Natur“ (erstmal) abzulehnen, sollte also immer differenziert werden – ob nun z. B. Windparks, PV-Felder, Stromleitungen oder Flusswärmennutzung – ob diese Eingriffe in die Umwelt die natürlichen Lebensgrundlagen stärken oder schwächen.

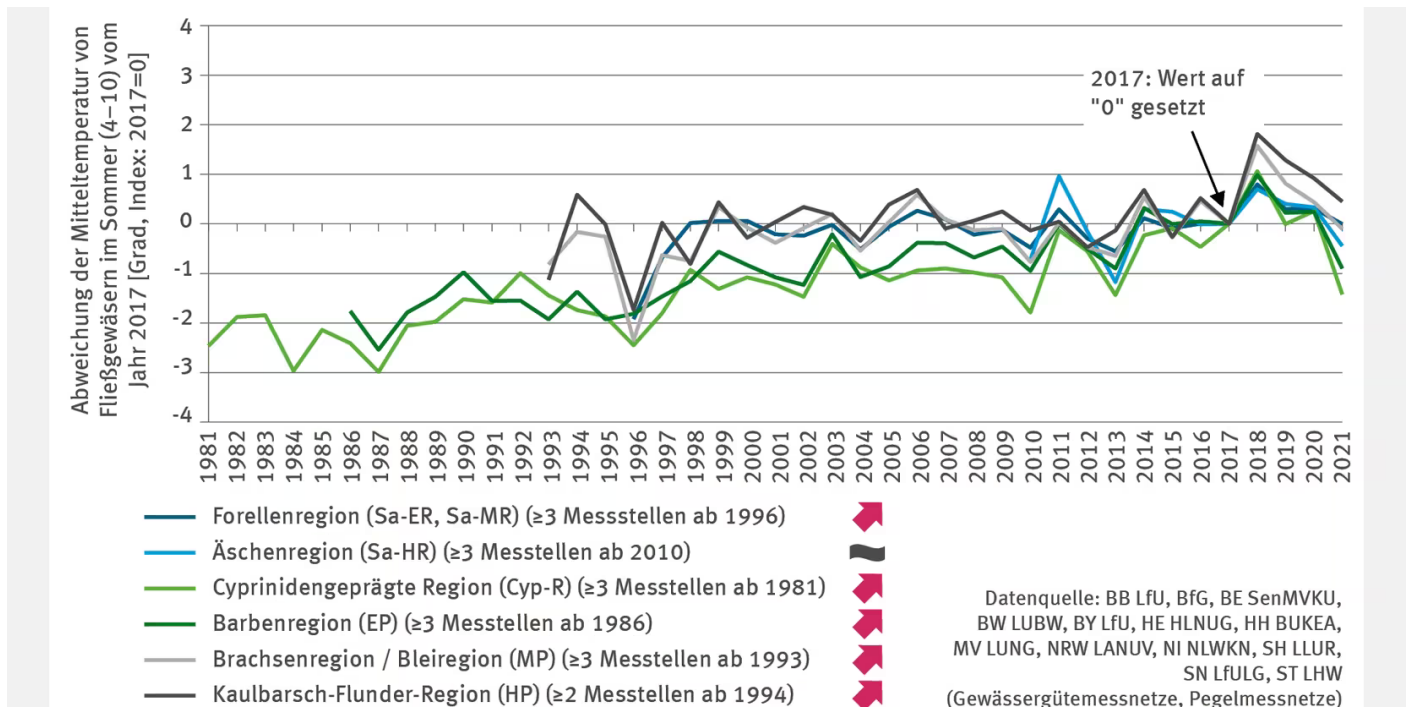
Die deutschen Fließgewässer sind in einem ökologisch katastrophalen Zustand!

Wer sich ernsthaft für Naturschutz als Lebensgrundlage für Flora, Fauna und Mensch einsetzt, weiß längst, die Flüsse sind zu warm, einige sind durch Salzeinleitungen aus Kalibergwerken belastet, fast alle durch Abspülungen von den Agrarflächen mit Nitrat und Phosphat überdüngt und durch Pestizide und Herbizide belastet. Nur ca. 8 % der Fließgewässer in Deutschland sind in ökologisch gutem Zustand und im Agrarland Niedersachsen sind es sogar nur 3 %. [61, 62, 63, 64, 65, 142, 143, 153]

Auch dass Kernkraftwerke und Kohlekraftwerke die Fließgewässer durch ihr Kühlwasser aufwärmten, wurde wie gesagt jahrzehntelang einfach hingenommen.

Die Wassertemperatur der Flüsse ist um bis zu 4 °C gestiegen

Dazu kommt inzwischen die massive Erwärmung der Fließgewässer durch den menschengemachten Klimawandel.

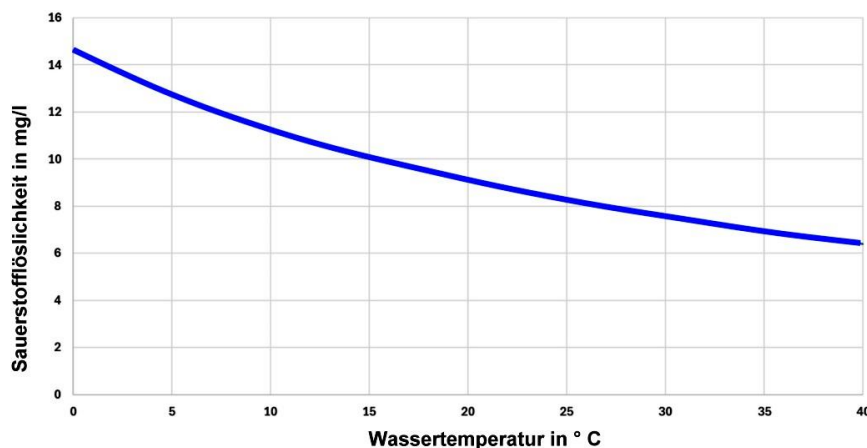


Die hier vom UBA dargestellten Messwerte zeigen, dass seit 1980 in den Extremwerten die Temperatur der Flüsse um bis zu 4 °C angestiegen ist, im langjährigen Durchschnitt um 2 °C [66]. Allerdings gehen die aktuellen Prognosen, z. B. für den Rhein, von einem Anstieg um weitere 2,2 °C bis spätestens 2100 aus [70], vorausgesetzt der allgemeine Temperaturanstieg wird nicht bei 2 °C gestoppt.

[Weitere in diesem Abschnitt verwendete Quellen 66, 67, 68, 69, 71, 72, 73, 161]

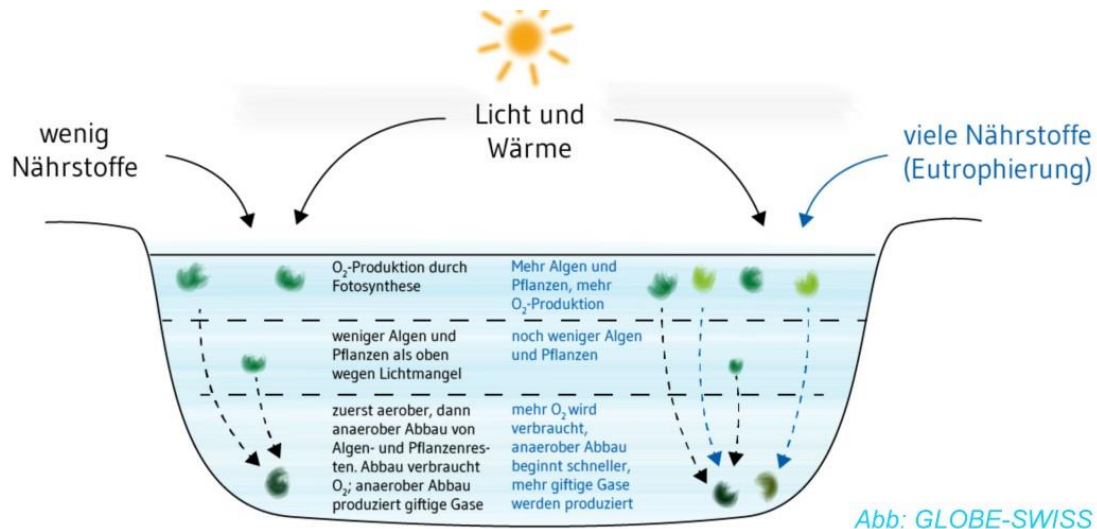
Der mit dem Temperaturanstieg sinkende Sauerstoffgehalt gefährdet die Flussfauna

Die Studie „Widespread deoxygenation in warming rivers“, die die Folgen der Flusserwärmung in den USA und Zentraleuropa untersuchte, kommt zum Ergebnis, dass die auch im Winter steigenden Temperaturen den Sauerstoffgehalt der Flüsse mindern [113]. Denn es ist ein Naturgesetz, dass mit steigender Temperatur die Löslichkeit von Sauerstoff im Wasser abnimmt. Bei Normalluftdruck von 760 Torr (bzw. 1013,2 hPa) sinkt sie von 14,6 mg/l bei 0 °C auf 8,2 mg/l bei 25 °C.



Begradigte, eingedeichte Flussläufe senken den Sauerstoffgehalt: Wasserdurchwirbelungen vergrößern die Wasseroberfläche und damit die Austauschfläche mit der Luft und erhöhen so die Sauerstoffaufnahme des Wassers. Das heißt, Schwellen in Fließgewässern, wie auch unverschlammte Kiesbänke, befördern die Sauerstoffaufnahme, was sich bei vielen begradigten Fließgewässern eher verschlechtert hat. [144]

Der Sauerstoffgehalt ist entscheidend für die Artenvielfalt in Gewässern: Als Faustregel kann gelten, dass in uneutrophierten Fließgewässern mit mehr als ca. 10 mg/l Sauerstoffgehalt eine artenreiche Gemeinschaft aus Fischen, Krebsen, Muscheln, Schnecken und einer Vielzahl von Kleinlebewesen als stabiles Biotop bestehen kann. Unter ca. 8 mg/l Sauerstoff kann es bereits zu deutlichen Beeinträchtigungen kommen und die Artenvielfalt kann abnehmen. Unter ca. 4 mg/l ist das Überleben vieler Arten, speziell auch der Fische, gefährdet. [78, 74, 75, 77, 80, 84, 86, 153, 159, 160]



Zusammenwirken von Eutrophierung, Temperaturanstieg und Sauerstoffschwund

Der Sauerstoffgehalt in Gewässern ist allerdings nicht nur von der Temperatur, sondern auch sehr stark von der Wasserflora abhängig. Wasserpflanzen und Algen erhöhen durch ihre Fotosynthese den Sauerstoffgehalt im Wasser im Idealfall sehr stark. Doch die Eutrophierung, d. h. die Einleitung von Phosphorhaltigen Wässern aus Kläranlagen und vor allem die Ausschwemmungen von Phosphat und Nitrat aus der Landwirtschaft, führt in vielen Fließgewässern zu einem übermäßigen (!) Wachstum von Pflanzen und Algen. Durch absinkende Wasserstände in heißen Sommermonaten wird dieses Wachstum durch die verstärkte Sonneneinwirkung noch extrem beschleunigt [163, 165]. Da diese Pflanzen und Algen nach ihrem Absterben jedoch unter starker Sauerstoffzehrung abgebaut werden, sinkt der Sauerstoffgehalt trotz starkem Bewuchs, für die Fauna oft in den lebensfeindlichen Bereich. Ja, im Extremfall kann es durch anaeroben Abbau sogar zur Bildung von für die Fauna giftigen Stoffen (z. B. H₂S) kommen. Da im Winter die Fotosynthese und damit die Sauerstoffbildung durch Pflanzen, wegen den mangelnden Lichts stark reduziert ist, kann es auch im Winter trotz niedriger Wassertemperaturen zu Sauerstoffmangel kommen. Bei Absenkung der Wassertemperatur wird allerdings die Abbaugeschwindigkeit und damit die Sauerstoffzehrung deutlich abgesenkt. (Chemische Reaktionen laufen bei 1 °C Temperaturerhöhung bis zu 10 % schneller ab). Das *Institut für Binnenfischerei Potsdam-Sacrow* [74] sagt jedenfalls „Akuter und chronischer Sauerstoffmangel ist eine der häufigsten Schädigungsursachen [der Wasserfauna]“.

[zum Thema Sauerstoffgehalt und Eutrophierung verwendete Quellen: 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86]

Belastet das Abkühlen des Gewässers Fauna und Flora?

Die Einwände von Seiten mancher Naturschützer betreffen vor allem die Gefahren für die Fischpopulation durch die Einleitung von „zu stark“ abgekühltem Wasser. Zu klären ist also:

- Wie weit führt die Einleitung von stark abgekühlten Wassermengen bei ungenügender Verwirbelung bzw. Vermischung zu direkter Schädigung von Fischen?
- Kommt es zur Vertreibung von Fischen durch die Ausbildung größerer „unterkühlter“ Wasserzonen?
- Werden die Laichmöglichkeiten eingeschränkt bzw. verschlechtert?

Fische passen sich den Wassertemperaturen an: 2008 kam das Institut für Binnenfischerei anhand Untersuchungen in der Elbe zum Ergebnis, dass sich fast alle Fischarten Temperaturschwankungen im Bereich zwischen 0°C bis 25 °C relativ problemlos anpassen. Nur bei den Salmoniden endet der Bereich unterhalb 15 °C. Zu allen Jahreszeiten werden jedoch zu schnelle Temperaturstürze um ca. 10 K für viele Fische lebensbedrohend [74].

Denn Fische sind wechselwarme Tiere, deren Körpertemperatur und Stoffwechsel direkt von der Umgebungstemperatur abhängen. Bei zu kaltem Wasser sinkt die Stoffwechselrate der Fische signifikant, sie werden träge, bewegen sich kaum noch und nehmen weniger oder gar keine Nahrung auf. Erfolgt eine Abkühlung allerdings nicht zu abrupt, passen sich die Fische in einer Art „Winterschlafmodus“ problemlos an Temperaturen bis nahe 0 °C an. Manche Fischarten suchen deshalb zum „Überwintern“, d. h. zum Herunterfahren des Energieverbrauchs, sogar bevorzugt besonders kalte Wasserbereiche auf. Es verwundert also nicht, dass von „zu kaltem“ Flusswasser eher keine Gefahren für die Fischpopulationen ausgehen. Das zeigen auch diverse Studien. Untersuchungen in der Limmat z. B. zeigten keine Auswirkung der Flusswärmepumpen auf die Fischpopulation. Stattdessen waren erhöhte Wassertemperaturen für die Salmoniden und vor allem die Behinderung der Fischwanderung durch Verbauungen und auch das Schwinden von geeigneten Laichplätzen* die Erklärung für einen Fischschwund über alle Arten von über 60 %. Auch in Deutschland waren bereits 1980 Glatzel und Heise in ihrer Studie „*Wärmepumpen und Gewässerschutz*“ zum Ergebnis gekommen, dass Abkühlungen des Fließgewässers um 3 K bis 5 K keine zu starken Temperaturstürze darstellen, sondern sich im Gegenteil auf das Ökosystem eher positiv auswirken.

[87, 88, 89, 90, 91, 92, 71]

(* je nach Fischart dienen strömungsarme Kiesbetten, verkrautete Uferzonen oder saubere Felsuntergründe zur Laichablage).

Es bedarf also offensichtlich keiner neuerlichen, besonderen Erforschung einer eventuell durch Flusswärmepumpen verursachten Kaltwasserproblematik für die Fauna der Flussbiotope. Auch das Gedeihen vieler Flusswasserbiotope (jedenfalls in durch Abwässer unkontaminierten Flüssen) in den kälteren Wintern der Jahrzehnte vor Beginn des massiven Klimawandels zeigt, dass heimische Flora und Fauna an zeitweises auch sehr kaltes Flusswasser bestens angepasst sind. [93, 94, 95, 96, 97, 97, 98, 99]

Die Temperaturabsenkung des entnommenen Wassers kühlt bei Rückführung den Fluss nur minimal ab: Oft wird anscheinend die Abkühlung des entnommenen Wassers mit der Abkühlung des gesamten Flusswassers verwechselt. Doch in der Regel wird nur ein Bruchteil der örtlichen Durchflussmenge für die Wärmepumpe entnommen. Deshalb ist bei genauer Betrachtung die Auswirkung auf die Wassertemperatur des Gesamtgewässers sehr gering. Würde z. B. 1/10 des Flusswassers mit einer Temperatur von 4 °C entnommen und auf 1 °C abgekühlt, käme bei der Rückführung nach Mischung mit dem übrigen Flusswasser eine Absenkung der Temperatur auf 3,7 °C zustande [105]. Wie eine Abkühlung um 0,3 K die Ökologie eines Gewässers beeinträchtigen sollte, bleibt rätselhaft, zumal die „natürlichen“ Schwankungen der Flusstemperatur auch im Winter wesentlich größer sind. Das Rechenbeispiel zeigt, dass unter der Berücksichtigung der gesetzlichen* 1,5 K bzw. 3 K Grenze problemlos sogar ca. 30 % der Durchflussmenge verwendet werden dürften. In Zürich wird zeitweise Wasser mit nahe 1 °C in die Limmat zurückgeführt, ohne dass sich daraus ökologische Unverträglichkeiten ergeben hätten. Im Gegenteil das Laichen der Forellen in der Limmat ist durch zu hohe Wassertemperaturen gefährdet [100, 154]. Und auch in Mannheim sind bislang keine durch Rückgabetemperaturen unter 2 °C verursachten Probleme bekannt [101].

(* Die bestehenden Wasserschutzgesetze in der Schweiz und in Deutschland legen fest, dass die Wassertemperatur durch Nutzung von Flusswasser zum Kühlen oder Heizen je nach Fischbesatz nicht um mehr als diese Werte verändert werden darf).

Kommt es durch die Rückführung des abgekühlten Wassers zu größeren Kältezonen? Eine weitgehende Durchmischung über die gesamte Breite und Tiefe eines Fließgewässers erfolgt nach einer Strecke, die dem 5- bis 15-fachen der Flussbreite entspricht. Umso turbulenter die Strömung ist, umso schneller erfolgt diese Durchmischung. Beispielsweise wäre in der mittleren Aller, die eine durchschnittliche Flussbreite von ca. 30 m besitzt, bereits nach

150 m bis 450 m wieder eine einheitliche Flusstemperatur erreicht. Wobei zu berücksichtigen ist, dass bei größerer Tiefe und in Zonen geringer Fließgeschwindigkeit des Gewässers aufgrund der temperaturabhängigen Dichte des Wassers (bei 4 °C ist die Dichte von Wasser am höchsten) eine gewisse natürliche Temperaturschichtung stattfinden kann. Die Ausbildung größerer Kältezonen, die in ihren Temperaturen unter dem Vorklimawandel-Niveau liegen, sind jedenfalls nicht zu erwarten. [102, 203, 104, 111, 112, 157, 158]

Bereits 2018 veröffentlichten Gaudard et al. eine umfassende Studie „*Impacts of using lakes and rivers for extraction and disposal of heat*“ [106]. Sie kam zum Ergebnis, dass die Auswirkungen der Einleitung von abgekühltem Wasser in den meisten Studien bis dahin meist nur punktuell (!) abgeschätzt wurden, während es bei Überprüfung in der Praxis kaum Auswirkungen auf das Gesamtökosystem des Gewässers gebe. So dass es in der Schweiz inzwischen unter Berücksichtigung der 1,5 K bzw. 3 K Regel (für die Temperaturdifferenz des Flusswassers vor Entnahme und nach Rückleitung) keine Genehmigungsbedenken der Naturschutzbehörden für die Flusswärmenutzung mehr gibt.

Fische haben bevorzugte aber keine festen Standorte: Bleibt die Frage zu klären, ob ein relativ kalter „Rückführungswasserstrahl“ die Fische vertreiben oder gar schädigen könnte. Bei der Nutzung von bestehenden Wasserkraftanlagen zur Flusswärmenutzung ist die Fischpopulation ohnehin in ihrem Standortverhalten bereits angepasst. Bei neu gebauten Flusswärmeanlagen, würden die Fische allerdings eventuell von ihren bisherigen Standorten vertrieben. Doch dies erscheint insofern unproblematisch, als Fische (bis auf die Bachforelle) gar keine festen, sondern nur bevorzugte (!) Standorte haben. Entgegen dem veralteten „*Home Range Konzept*“, das Standort treue Fische unterstellte, weiß man heute, die Fische einer Population können während des Tagesablaufs, aber auch saisonal und abhängig von ihren Entwicklungsstadien zwischen verschiedenen Habitaten ihres Lebensraumes Ortsänderungen vollziehen. Das heißt Fische weichen nicht nur kurzfristig Änderungen von Strömung oder Temperatur aus. Sie wechseln mit den Jahreszeiten nach Nahrungsbedarf und Nahrungsangebot und mit den Laichzeiten. Generell weichen die Fische auch zu starken Strömungen aus. [107, 108, 109, 110, 118]

Das heißt i. d. R. werden sich die Fische an die Einleitung des rückgeführten Wassers problemlos anpassen. Problematisch könnte es lediglich zu den Laichzeiten werden, wenn Fische aus ihren Laichgebieten vertrieben würden. Doch das ist als Folge von Flusswasserwärmepumpen unwahrscheinlich, da die Laichzeiten nicht mit der Heizperiode zusammenfallen, die Wärmentnahme aus den Flüssen zu diesen Zeiten also geringer sein wird. Andererseits wäre eine gewisse Flusswasserabkühlung auch zu den Laichzeiten eher ökologisch förderlich, da Temperaturen, die den Laich der heimischen Fischarten bereits schädigen, dem Laich bzw. der Vermehrung zugewanderter Fischarten und Krebse zu gute kommen [81].

Der Temperaturanstieg ist auch das Hauptproblem für wirbellose Arten und Wasserinsekten. Wie bereits ältere Studien aber nun auch ein aktueller Monitoring-Bericht der KLIWA* zeigen, ist der Temperaturanstieg der Gewässer und der zunehmende Sauerstoffmangel auch für diese Tierarten eine Hauptursache für ihren zunehmenden Schwund. Heimische Krebse, Schnecken und Muscheln und Insekten schwinden, und werden z. T. durch invasive, besser an den Klimawandel angepasste Arten ersetzt. 2020 werteten Baranov, Hasse et al. Langzeitmessungen aus, die den Insektenbestand im von Agrareinspülungen unbeeinträchtigten Breitenbach im Naturschutzgebiet Ostthessisches Bergland verfolgten. Sie konstatierten einen Rückgang der Wasserinsekten in den letzten 40 Jahren um 80 Prozent. Die Hauptursache sehen die Wissenschaftler eindeutig im Klimawandel. [114, 141, 152]

(*KLIWA „*Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft*“ als länder- und fachübergreifende Kooperation).

Zwischenfazit:

Unter den Gesichtspunkten des fortschreitenden Klimawandels und dem ökologisch schlechten Zustand der deutschen Fließgewässer kann eine Absenkung der Wassertemperatur, ob im Sommer oder Winter, die Biodiversität nur unterstützen!

Schädigt das Ansaugen und Durchziehen des Wassers durch ein Rohrsystem Flora und Fauna? Wie die historischen Erfahrungen der Nutzung von Flusswasser zur Kühlung von Kraftwerken zeigen, kann es bei der Ansaugung durchaus zu Schädigungen der Fauna kommen. Denn wenn Fische oder die Larven von Fischen, Krebsen und Muscheln dauerhaft an den Feinrechen und Filtern der Ansaugung hängen bleiben, führt das letztlich zu ihrem Tod. Doch durch den Einsatz entsprechender Technik lässt sich das heute weitestgehend vermeiden. Die Lösung heißt, die Strömungsgeschwindigkeit am Einlauf so weit zu minimieren, dass Lebewesen nicht angesaugt werden, während gleichzeitig eine konstante Wasserversorgung gewährleistet bleibt. Das heißt, relativ großflächige Ansaugung, also nicht durch ein schmales Rohr, sondern über eine relativ große Fläche. Denn eine große Fläche führt bei gleicher Wassermenge zu einer geringeren Strömungsgeschwindigkeit (geringer Sog) pro Quadratmeter. Die EPA (United States Environmental Protection Agency) fordert z. B. eine maximale Anströmgeschwindigkeit von 0,15 m/s, die über 96 % der Lebewesen vor haftendem Ansaugen schützt. Auch bei den Feinrechen und Feinsieben gibt es heute eine Fülle technischer Lösungen, die eine Ansaughaftung mit über 90 % Sicherheit vermeiden. Die Kombination von minimierter Ansaugströmung mit entsprechenden mechanischen Filtern sollte also auch die Flusswärmenutzung diesbezüglich ökologisch unbedenklich machen. Übrigens sollte das Durchziehen von Lebewesen durch den Wasserkreislauf heute nach Stand der Technik allein schon aus wirtschaftlichen Gründen ausgeschlossen sein, da dies den Wartungsaufwand der Anlagen stark erhöhen würde. [115, 116, 117]

Droht Chemikalieneintrag durch Systemreinigung? Früher wurde die Leitungen von Flusskühlwasserkreisläufen oft mit umweltschädlicher Chemie (z. B. Chlordioxid oder Natriumhypochlorit) gereinigt bzw. hatten die Leitungen Antifouling-Beschichtungen, die gefährliche Stoffe freisetzen (z. B. giftige Zinn-Ionen). Moderne Anlagen arbeiten dagegen mit extrem glatten, umweltneutralen Beschichtungen, auf denen nichts dauerhaft fest haftet. Und mit Hochdruck-Wasserspülung, Wasser-Druckluftspülung oder Molchen gibt es inzwischen bewährte, umweltneutrale Reinigungsmethoden. [119, 120, 121]

Belastung des Gewässers bei Defekten durch Austreten des Arbeitsmittels bzw. Kältemittels? In der Vergangenheit wurde für fast alle großen Wärmepumpen als Arbeits- bzw. Kältemittel Ammoniak eingesetzt. In geringer Konzentration ist Ammoniak für den Menschen ungefährlich, in höherer Konzentration allerdings ätzend und bei längerer Exposition tödlich. Für die Aquafauna ist Ammoniak jedoch sowohl als NH₃-Gas als auch als Ammoniumion (NH₄⁺) bereits in geringer Konzentration hoch giftig. Ab 0,02 mg/l (ungelöstes NH₃) und über ca. 0,6 mg/l (NH₄⁺) wirken für die meisten Fischarten bereits tödlich. Allerdings ist es im Lauf der Jahrzehnte durch Ammoniak-Wärmepumpen (sie werden ja auch für Kühlhäuser, Eisstadien, Bob- und Rodelbahnen eingesetzt) immer wieder zu Unfällen gekommen. Doch gefährliche Unfälle sind sehr selten, da der extrem penetrante Geruch des Ammoniaks bereits kleinste Lecks in den Anlagen erkennen lässt. Aus der Schweiz, wo über Jahrzehnte Ammoniak-Wärmepumpen auch für Flusswasserwärme genutzt wurden, ist jedenfalls kein einziger Unfall mit Ammoniak-Austritt ins Wasser bekannt. Inzwischen geht der Trend bei Großwärmepumpen ohnehin zum Einsatz von Propan (R290) oder CO₂ (R744), die bei entsprechender Technologie sogar besonders hohe COP ermöglichen. Beide Kältemittel sind umweltneutral und haben in den verwendeten Mengen keine Klimawirkung. [122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129]

Als Gefrierschutzmittel, die bei im Flusswasser liegenden Wärmetauschern nötig sind, genügen für diese Temperaturbereiche in geringen Mengen ökologisch unbedenkliche Substanzen wie Ethanol und/oder Glycerin.

Schweiz und Bayern machen es vor, Flusswärme ohne Umweltscheuklappen

In der Schweiz einfache Regeln für Flusswärme bereits seit 2017

Für die Entnahme und Rückführung von Flusswasser zu Kühlzwecken gab es und gibt es auch in der Schweiz Vorbehalte, die darauf abzielen, Erhöhungen (!) der Flusstemperatur um mehr als 0,5 K zu verhindern. Derzeit gelten allerdings noch dieselben Bedingungen wie für Heizzwecke. 2017 wurde vom Bundesamt für Energie BFE das bestehende Wasserschutzgesetz von 1998 mit der Revision von 2011 bezüglich der Nutzung von Oberflächengewässern zu Heizzwecken folgendermaßen kommentiert: „... Temperatur eines Fließgewässers darf durch Wärme-

eintragenzug gegenüber dem möglichst unbeeinflussten Zustand um höchstens 3 °C, in Gewässerabschnitten der Forellenregion um höchstens 1,5 °C, verändert werden. ... Diese Anforderungen gelten nach weitgehender [!] Durchmischung. ... **Die Rückgabe von abgekühltem Wasser (aus der Wärmenutzung) wird unter Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben ökologisch nur als gering relevant betrachtet.** ...“ [130]

Darauf basierend formulierte z. B. der Kanton Zürich sehr einfache und klare Regeln für eine ökologisch unbedenkliche Nutzung von Flusswärme [131]. „Zur Entnahme von Wasser für Heizanlagen aus Fließgewässern eignen [!] sich nur Gewässer mit einem Niedrigwasserabfluss grösser als 500 l/s.“ Das ist strenggenommen keine ökologische, sondern eine ökonomische Einschränkung, da die nachgenannten Bedingungen auch mit geringeren Abflussmengen eingehalten werden könnten. Denn bei voller Nutzung von 500 l/s für Heizzwecke ließen sich mit $\Delta T = 3 \text{ K}$ des Flusswassers und mit einem ΔT von ca. 4 K des entnommenen zum rückgeführten Wasser immerhin ca. 6 MW Heizwärme gewinnen. Die eigentlichen ökologischen Bedingungen sind:

- Die Temperatur eines Fließgewässers im Kanton Zürich darf sich durch Wärmeentzug gegenüber dem unbeeinflussten Zustand um höchstens 1.5 K verändern. 1,5 K, da alle Fließgewässer im Kanton im Forellenbereich liegen, für andere Nichtsalmonidengewässer gilt in der Schweiz generell 3 K.
- Das Abflussvermögen der Fließgewässer darf durch Einbauten nicht vermindert werden.
- Durch die Entnahme dürfen keine neuen Wanderhindernisse entstehen und der Rückbau bestehender Wanderhindernisse darf nicht verunmöglicht werden.
- Das Entstehen einer Restwasserstrecke ist zu vermeiden. Das heißt, bei Entnahme eines erheblichen Anteils des abfließenden Wassers hat die Rückgabe unmittelbar nach der Entnahme zu erfolgen.

Bayerisches Landesamt für Umwelt 2025 erleichtert die Flusswärmenutzung

In der Broschüre „Betreiberhinweise zur Planung, Genehmigung und Betrieb von Wärmetauscheranlagen zur Wärme-gewinnung aus Fließgewässern“ gibt das LfU Bayern Hinweise [105]. Erklärtes Ziel des LfU ist es, die Nutzung von Flusswärme zu erleichtern:

- Eine wasserrechtliche Erlaubnis ist für jede Gewässerbenutzung notwendig.
- Wichtiges Kriterium für die Erlaubnis ist die Temperaturabsenkung im Gewässer mit ihren Auswirkungen auf die Gewässerorganismen oder andere Gewässernutzungen. Bleibt die Abkühlung unter einem Wert von $\Delta T 3,0 \text{ K}$ (1,5 K in Salmonidengewässern) nach vollständiger [!] Durchmischung, ist eine Nutzung in der Regel möglich und das Antragsverfahren einfach.

	Fließgewässer
Minimale Gewässertemperatur (T_{\min}) nach vollständiger Durchmischung am Ort der Einleitung	3 °C
Temperaturschwelle: rechnerische Temperaturabsenkung nach vollst. Durchmischung (ΔT_{GW})	3,0 K (1,5 K in Salmonidengewässern)
Max. Temperaturänderung des entnommenen Wasserstroms (ΔT_{WT}) im Wärmetauscher	10 K

- **Hinweis:** Die in dieser Tabelle angegeben Minimale Gewässertemperatur von 3 °C würde in vielen Fällen die Nutzung des Flusswassers im Winter unmöglich machen. Das widerspricht nicht nur der Intention des LfU, Flusswärmenutzung eigentlich zu fördern, sondern auch der Studie des FfE. (Siehe dazu auch Unterkapitel: „Rätselhafte 3 °C Grenze droht Flusswassernutzung einzuschränken“!)
- Die durch die Wärmenutzung entstehenden baulichen Eingriffe in das Gewässer und den Uferbereich sind separat zu bewerten. Hier gelten im Bund und in den Ländern ähnliche Bestimmungen wie in der Schweiz (siehe oben!).

In Brandenburg konnte Flusswärme sogar im Naturschutzgebiet genutzt werden

Allerdings ist in den meisten Fällen der Verbauungsaufwand und damit die Beeinträchtigung der Umwelt nicht besonders groß. Das zeigt zum Beispiel das Einlauf- und Auslauf-Bauwerk der Stadtwerke Wittenberge für eine 1,1 MW Wärmepumpe an der Stepenitz. Damit die ökologische Verträglichkeit gewährleistet ist, war eine enge Zusammenarbeit mit der Unteren Wasserbehörde vonnöten. Denn der gesamte Flusslauf der Stepenitz ist als Naturschutzgebiet ausgewiesen. Das Ergebnis ist der Einsatz eines engmaschigen Trommelrechs, so dass keine Fische oder andere Tiere eingesaugt werden. Und obwohl sich das Bauwerk im Überschwemmungsgebiet des Flusses befindet, kann es ohne Probleme überflutet werden. Auch die Rückleitung des um vier Kelvin abgekühlten Wassers bereitet keine Probleme. [132, 133]



Abbildung: Stadtwerke Wittenberge

Wie viel Wärme darf entnommen werden?

Rätselhafte 3 °C Grenze droht Flusswassernutzung einzuschränken

In manchen Studien und auch in den Betreiberhinweisen des LfU Bayern tauchten 3 °C als untere Grenze für die Flusswassertemperatur auf, unter der man kein Wasser mehr entnehmen könne. Es gibt den technischen Vorbehalt, dass unter 3 °C der Wärmetauscher der Wärmepumpe vereisen könnte. Doch das scheint in der Praxis längst überholt zu sein.

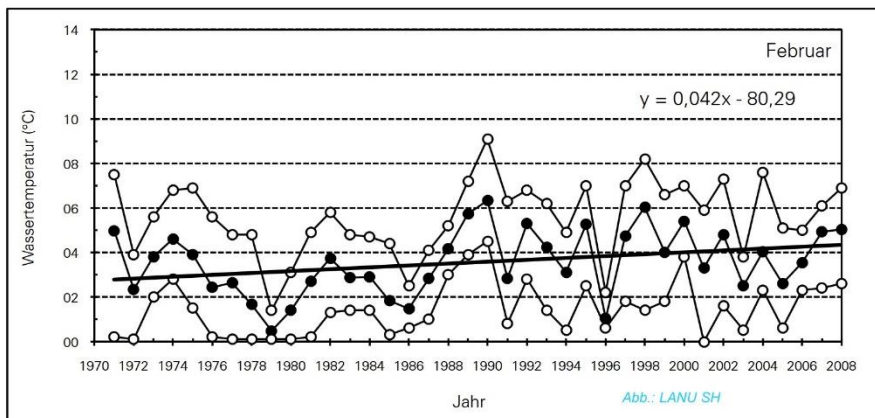
Aber es gibt auch Vorbehalte von Seiten des Naturschutzes, dass das Flusswasser zum Wohle der Fauna nicht unter 3 °C abkühlen dürfe. In der LAWA Publikation *Grundlagen und Leitlinien für eine ökologisch verträgliche Nutzung von Gewässern zur Wärmegewinnung* von 2023 findet man die Aussage: „Da Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt eine hohe physiologische Belastung für sehr viele Gewässerorganismen, insbesondere Fische mit sich bringen sollte zum Schutz der Biozönose keine anlagenbedingte Abkühlung von Seen auf Temperaturen unter 3°C erfolgen, auch wenn die Anforderungswerte für die zulässige Temperaturverminderung noch nicht ausgeschöpft sind.“ [16]. Andererseits findet man in der LAWA-Studie von 2021 *Temperaturempfindlichkeiten der Fischgemeinschaften in deutschen Fließgewässern*: „Da Wassertemperaturen im Jahresverlauf variieren und Fische sich sowohl an kalte als auch an warme Lebensräume akklimatisieren können, ist auch der Reaktionsbereich der Fische auf die Umgebungstemperatur nicht statisch, sondern hängt von der Ausgangstemperatur und der Differenz und Geschwindigkeit der Temperaturänderung ab.“ Des Weiteren wird darauf hingewiesen: „So sind in Fließgewässern der Rhithralregionen [Ober- und Mittellauf] die täglichen Temperaturschwankungen höher als in Fließgewässern der Potamalregionen [Unterlauf] und können in Extremfällen beinahe 9 K erreichen“ [134].

Tatsache ist, dass sich bei den meisten Fischen unter ca. 3 °C der Stoffwechsel extrem reduziert. Doch dieses Verhalten des Fischstoffwechsels ist kein „Sterbeprogramm“, sondern in Wirklichkeit ein natürlicher Überlebensschutz, der das sichere Überwintern der Fische auch in strengen Wintern sichert. Ja viele Fische suchen im Winter bevorzugt besonders kalte Wasserstellen auf, denn ohne heruntergefahrenen Stoffwechsel würden sie schlicht verhungern. Nur bei schockartiger Abkühlung (wie an anderer Stelle bereits zitiert um ca. 10 K und mehr) ist das Überleben der Fische i. d. R. gefährdet. Doch diese schockartigen Abkühlungen können vielleicht im Labor oder am

Schreibtisch simuliert werden, sie kommen aber in der Praxis mit oder ohne Wärmepumpen in realen Flussläufen kaum vor. Worauf u. a. ja auch Gaudard et al. in ihrer Kritik punktförmiger Abkühlungsmodelle hinwiesen, die einer Überprüfung in der Praxis nicht standhielten [106]. Dass die Anglerverbände zwar einerseits die Erwärmung der Flüsse bejammern, aber andererseits befürchten, dass bei zu kaltem Flusswasser „ihre“ Fische nicht mehr beißen, kann aus wissenschaftlicher Sicht wohl als Hobby-Lobbyismus abgetan werden [135].

Von Flusswärmepumpen erzeugte Abkühlung bleibt im Rahmen der natürlichen Schwankungen

Wie das Studium der „natürlichen“, von Wärmepumpen unbeeinflussten Flusswassertemperaturen zeigt, fielen sie bereits vor Einsetzen des Klimawandels in strengen Wintern immer wieder auf Werte um 0 °C. Doch an diese Tiefstwerte, sind die angestammten Populationen von Fischen, Krebsen, Schnecken etc. offenbar bestens angepasst. Diese natürlichen winterlichen Tiefstwerte zeigt z. B. der winterliche Temperaturverlauf in der Treene:

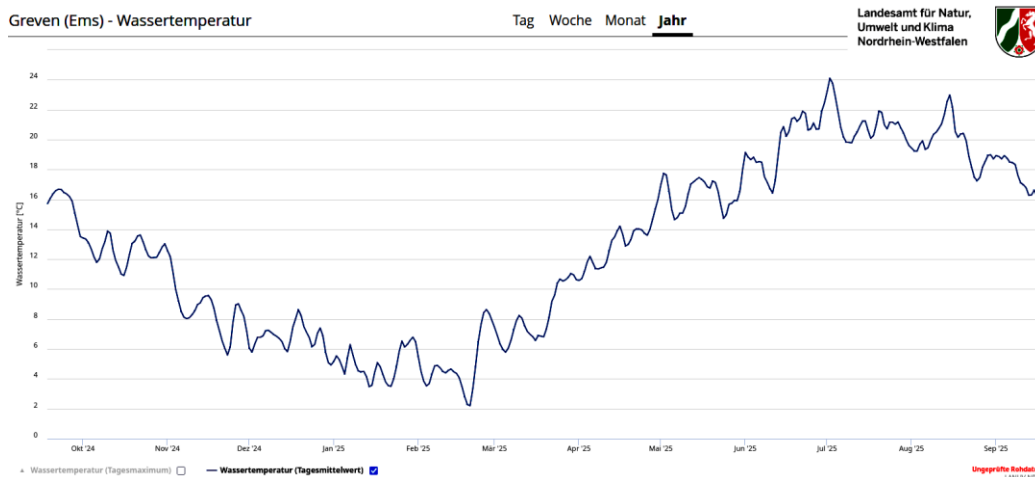


Monat	Erwärmung °C	Monat	Erwärmung °C
Januar	1,91	Juli	2,15
Februar	1,69	August	2,42
März	2,26	September	2,30
April	3,95	Oktober	1,95
Mai	3,14	November	1,28
Juni	2,12	Dezember	0,92

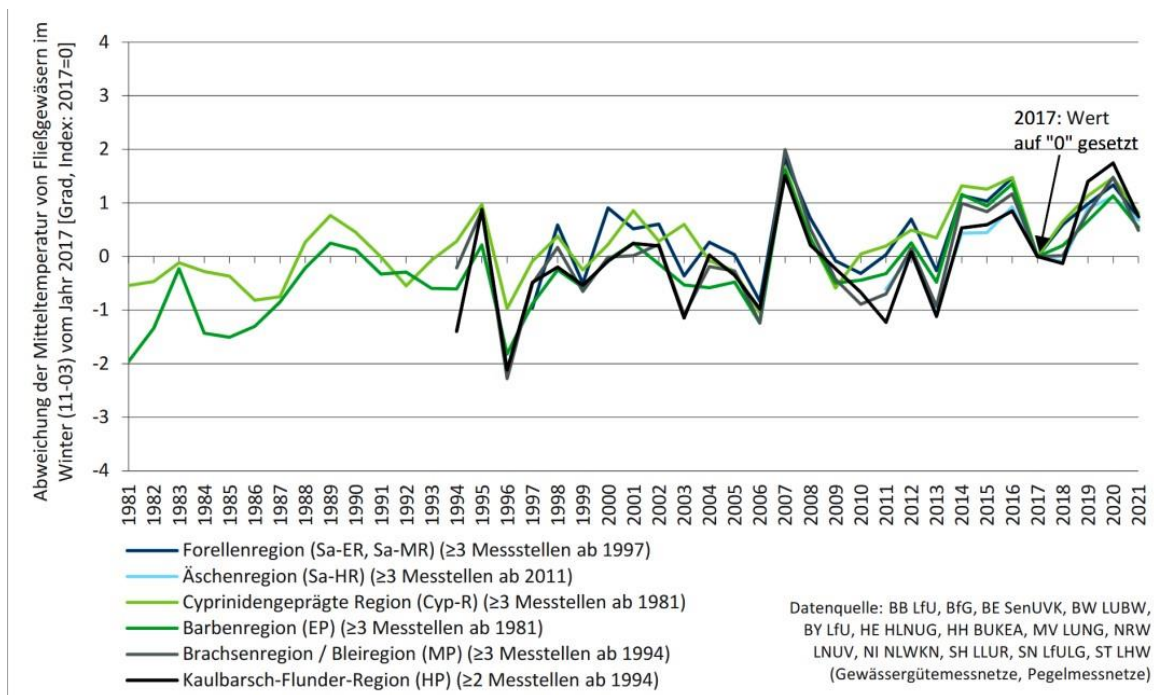
Abbildung: Klimawandel und Fließgewässer in Schleswig-Holstein, LANU SH

Und wie das Beispiel der Treene am Pegel Treia (Schleswig-Holstein) auch zeigt, war die mittlere Tieftemperatur im kältesten Wintermonat Februar (siehe Tabelle) mit dem beginnenden Klimawandel bereits von 1970 bis 2008 um 1,69 K angestiegen.

Die Daten der LANUK für die Ems z. B. zeigen, dass in 2024/25 die Temperaturen nie unter 2 °C gesunken sind. [172].



Eine Zusammenfassung durch das UBA der Wassertemperatur-Daten seit 1981 in den deutschen Fließgewässern zeigt, die Temperatur sind auch im Winter um bis zu 4 K gestiegen [164].



Es ist also nicht ersichtlich, warum dieser von der Natur vorgegebene Temperaturspielraum nicht von Flusswärmepumpen genutzt werden sollte.

Bezüglich der Flusswasserabkühlung bestehen große Spielräume

Hierzu gibt das LfU Bayern ein ermutigendes Rechenbeispiel für eine Flusswasserwärmepumpe, die mit einer Entnahmeleistung von 10 MW errichtet wird [105]. Die für die Gebäudeheizung nötige Wärmeleistung liegt je nach energetischem Gebäudezustand zwischen ca. 4 kW und 12 kW pro Haushalt. So dass mit einer 10 MW Flusswärmepumpe ca. 800 Haushalte versorgt werden können. Die LfU rechnet nun so: Der maximale Entnahmestrom beträgt 0,6 m³/s (Q_{WT}) bzw. 2160 m³/h bei einer maximalen Abkühlung von 4 K (ΔT_{WT}). Der MNQ (mittlerer Niedrigwasserabfluss) des Gewässers beträgt im Sommer 11,5 m³/s und im Winter 10,3 m³/s. Die maximale Abkühlung im Gewässer ergibt sich dann zu:

$$\text{Sommer: } \Delta T_{GWmax} = \frac{0,6 \text{ m}^3/\text{s}}{11,5 \text{ m}^3/\text{s}} * 4\text{K} = 0,21 \text{ K} \quad \text{Winter: } \Delta T_{GWmax} = \frac{0,6 \text{ m}^3/\text{s}}{10,3 \text{ m}^3/\text{s}} * 4\text{K} = 0,23 \text{ K}$$

Bis zu den Grenzwerten von 1,5 K bzw. 3,0 K bestehen sogar noch riesige Nutzungsreserven. Das zeigt auch die nachfolgende Tabelle der FfE-Studie:

Temperaturänderung des Gesamtgewässers in Abhängigkeit von Entnahmemenge und Temperatursprizung der Wärmepumpe

	1 %	2 %	5 %	10 %	20 %	50 %	100 %
ΔT=1 K	0,01	0,02	0,05	0,10	0,20	0,50	1,00
ΔT=2 K	0,02	0,04	0,10	0,20	0,40	1,00	2,00
ΔT=3 K	0,03	0,06	0,15	0,30	0,60	1,50	3,00
ΔT=4 K	0,04	0,08	0,20	0,40	0,80	2,00	4,00
ΔT=5 K	0,05	0,10	0,25	0,50	1,00	2,50	5,00
ΔT=6 K	0,06	0,12	0,30	0,60	1,20	3,00	6,00

Bei realistischer Einschätzung zeigt sich, die Flusswasserabkühlung ist nicht die Schranke

Fasst man die Schweizer Bestimmungen und Erfahrungen zusammen, dann ist – vorausgesetzt es kommt durch die Flusswärmenutzung zu keinen ökologisch störenden Verbauungen (Wasserabfluss, Durchgängigkeit) – auch die Temperaturabsenkung des Flusswassers ganz offensichtlich nicht das Problem. Die Sachlage bei den bayerischen Bestimmungen ist, wie gesagt, bezüglich der Mindestwassertemperatur noch unklar.

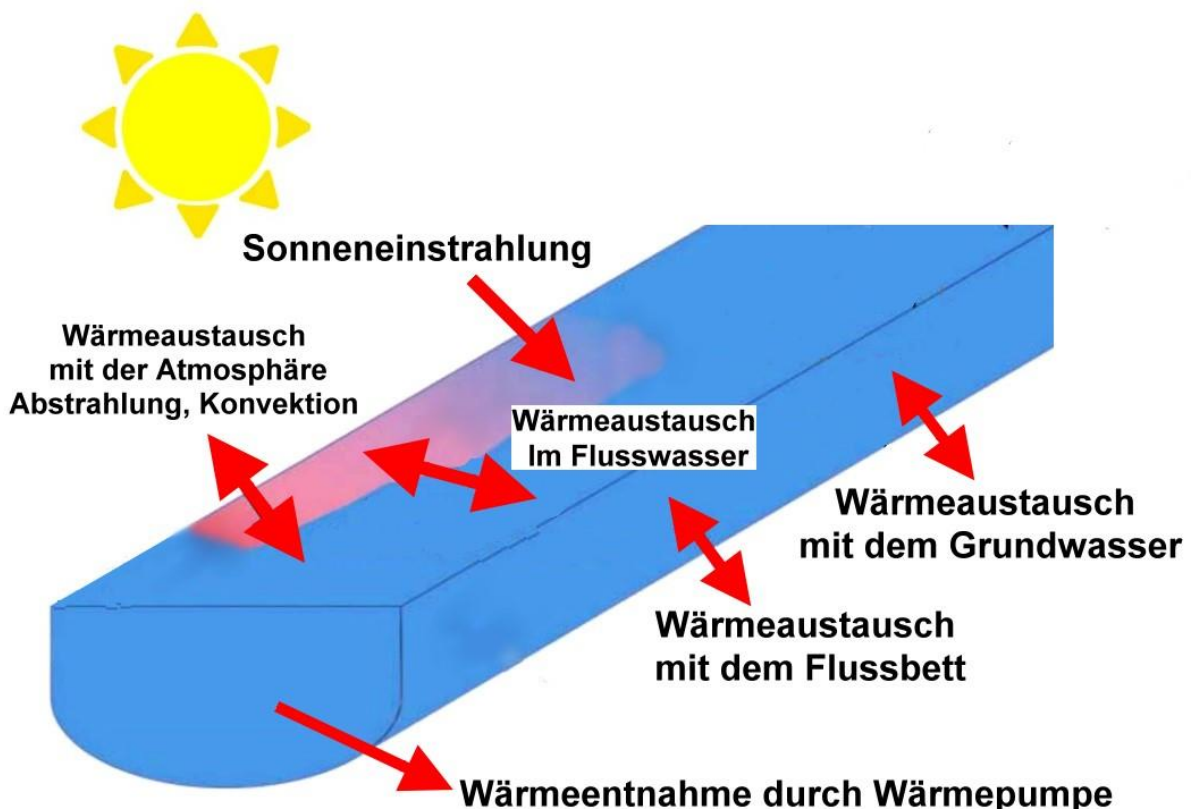
Wie viel Wärme kann entnommen werden?

Die Frage ist letztlich, reichen die jeweiligen Wassermengen und die entnehmbaren Wärmemengen aus, um ein geplantes Wärmenetz ausreichend mit Wärme zu versorgen.

Werden zu viele Flusswärmepumpen sich gegenseitig die Wärme wegnehmen?

Die Frage einer evtl. zu starken der Abkühlung des Flusswassers ist ja nicht nur ein ökologisches Problem, sondern evtl. auch ein Problem der Begrenztheit der für Heizzwecke entnehmbaren Wärmemenge.

Würde entlang eines Fließgewässers nacheinander an zu vielen Stelle Wärme entnommen, könnte ja die Temperatur und damit der Wärmegehalt des Wassers so stark absinken, dass flussabwärts die Wärmentnahme ineffizient würde. Doch um zu beurteilen, ob ein Fluss nicht auch im Winter als Wärmekollektor dienen kann, muss der gesamte Wärmeaustausch mit der Umgebung betrachtet werden. Der Wärmeaustausch mit der Umgebung ist erstmal vom Verhältnis der Gesamt-Oberfläche zur Gesamtwassermenge abhängig und dann davon, wieviel von dieser Gesamtfläche „Kontakt“ mit der Luft, der Sohle und dem Grundwasser hat. Im Sommer mag die Wärmeeinstrahlung durch die Sonne und die konvektive Wärmezufuhr durch den Luftkontakt vorherrschend sein. Doch im Winter sinkt mit sinkender Wassertemperatur die Wärmeabstrahlung und nur bei Lufttemperaturen deutlich unter dem Nullpunkt ist die Abgabe durch Konvektion an die Luft groß.



Der Wärmeaustausch mit Sohle und Grundwasser spielt jedoch eine bedeutende Rolle und trägt zum Wiedererwärmen des Flusswassers bei. Dieser deutliche Einfluss von Flussbett und Grundwasser wird von mehreren aktuellen Studien bestätigt. [166, 167]. Die LEA-Studie „Wärmequellen Hessen“ kommt zum Ergebnis „Die natürlichen Wärmetransportprozesse finden alle über die Oberfläche des Fließgewässers statt, die damit ein

wesentlicher Modellparameter ist. Der Wärmeaustausch mit der Gewässersohle ist im Verhältnis zu den anderen Wärmetransportprozessen gering und wird im vorliegenden Modell vernachlässigt.“ Und beruft sich dabei auf letztlich das LARSIM-Wasserhaushaltsmodell. [5, 168]

Die LEA-Studie kommt – auch ohne explizite Berücksichtigung des Wärmeaustauschs mit der Flusssohle aber unter Einbeziehung einer großen Anzahl von Messungen (über 50 Flusstemperaturmessstellen) zum Ergebnis: „Mit Hilfe eines neu entwickelten Simulationsmodells für Wassertemperaturen in Fließgewässern konnte anhand eines Beispiels (für die Nidda) gezeigt werden, dass die wiederholte Wärmeentnahme nicht zu einer kritischen Abkühlung des Fließgewässers führt.“ Ja, dass sich bereits nach weniger als 10 km die Hälfte der entnommenen Wärme wieder regeneriert hat.

Wann ist die Wiederaufwärmung des Gewässers eventuell zu gering?

Allerdings steigt mit sinkendem Wasservolumen eines Gewässers der Wärmeverlust durch Abstrahlung und Konvektion an der Wasseroberfläche. Dugdale et al. [169] kamen 2017 durch Messungen an drei kleineren „Flüssen“ in Großbritannien (1,3 - 1,5 m breit, knapp 0,1 m³/s) zum Ergebnis: „Total heat flux between the channel and streambed is several orders of magnitude lower than at the air-water interface.“ Allerdings werden in Deutschland Fließgewässer mit weniger als ca. 20 m³/s Durchfluss als „Bäche“ bezeichnet. Ein Rinnsal mit nur 0,1 m³/s Durchfluss würde wohl keiner als Wärmequelle nutzen wollen. Auch die Arbeit von Beltaos et al. [170] von 2009, die vereiste Flüsse im Norden Kanadas untersuchte und zum Ergebnis kommt, dass der Wärmeaustausch mit dem Flussbett kaum eine Rolle spielt, lässt sich nicht auf Mitteleuropa übertragen. Denn in Deutschland werden durch die Wärmeinstrahlung im Sommer Erdreich und Grundwasser zu Wärmespeichern. Auch die sommerliche Erwärmung der Flüsse selbst führt zur Erwärmung des Grundwassers in Ufernähe, so dass vielerorts ufernahes Grundwasser auch im Winter weit über 10 °C Dauertemperatur liegt. Bereits 2008 stellte das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie fest, dass das Grundwasser in Wiesbaden-Biebrich auch im Winter bei 14 °C lag [171]. Die Grundwassertemperaturkarten für ganz Hessen zeigten für die mit dem Flusswasser korrespondierenden Schichttiefen ähnliche hohe Werte.



Jahreszeitliche Verschiebung der Temperatur des Grundwassers in 7 bis 9 m Tiefe; Messung 1 m unter Grundwasserspiegel. Grundwassermessstelle Wiesbaden-Biebrich Nr. 506034.

Abbildung: aus Jahresbericht 2008 des Hessischen Landesamts für Naturschutz, Umwelt und Geologie

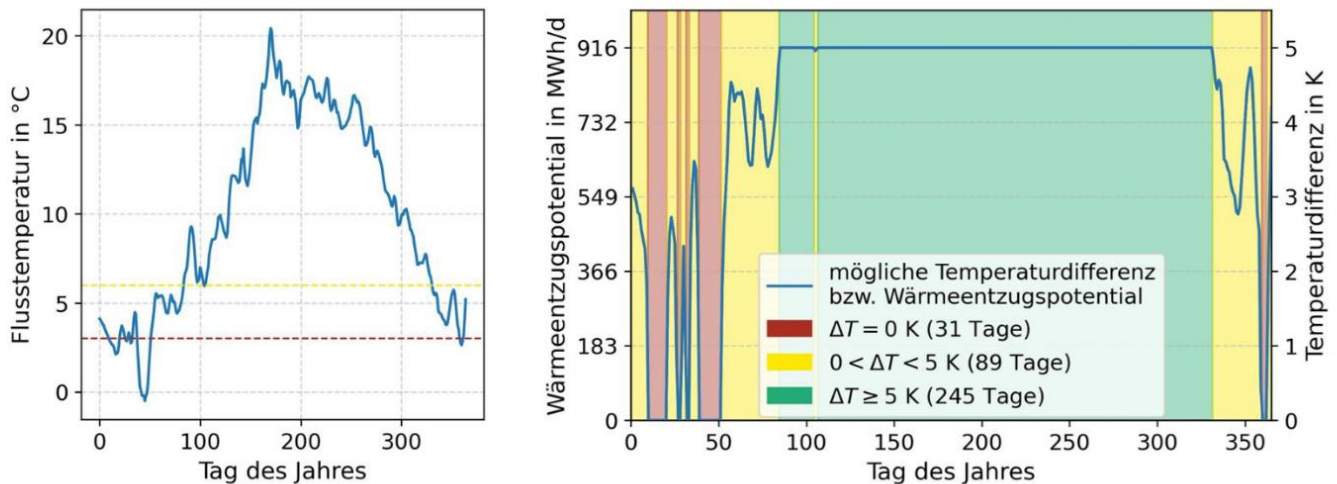
Der Deckungsgrad eines Wärmenetzes aus Flusswärme ist sehr variabel

Die jährlich aus dem Flusswasser entnehmbare Gesamtwärmemenge gibt ein stark irreführendes Bild. Denn im Sommer steht – abgesehen von eventuellen Wassertiefständen – im Verhältnis von Heizverbrauch meist ein Vielfaches an Wärme zur Verfügung. Entscheidend ist aber die im Winter während der Hauptheizperiode an den Kältetagen entnehmbare Wärmemenge. Diese wird allerdings unterschiedlich eingeschätzt.

Der erreichbare Deckungsgrad hängt von den Vorgaben ab

Hessen: Flusswärme ist nur sehr begrenzt einsetzbar

Die LEA-Studie [5] kommt für Hessen zu einem relativ pessimistischen Ergebnis.



Die Abschätzungen der LEA-Studie anhand der Fulda nahe Kassel beruhen auf folgenden Vorgaben:

- Durch vorherige Entnahmen (am Oberlauf) ist die Flusswassertemperatur bereits um 0,5 K abgekühlt. (Autor: Das ist, wie wir an anderer Stelle gesehen haben, in vielen Fällen fraglich)
- Der Entnahmevolumenstrom entspricht 10 % der Mindestdurchflussmenge (MNQ) (Autor: Oft könnte man auch mehr entnehmen).
- Das entnommene Wasser wird um 5 K abgekühlt. (Autor: Je nach Flusswassertemperatur kann der Wert deutlich niedriger liegen).
- Mindesttemperatur entnommenes Wasser nach Wärmeentzug: 1 °C (Autor: Generell wären auch 0,5 °C oder sogar Flüssigeis möglich).
- Mindesttemperatur Fließgewässer nach Durchmischung: 3 °C (Autor: Die natürlichen Schwankungen der Flusswassertemperatur gehen auch deutlich tiefer. Warum darf dieser Spielraum nicht genutzt werden?)
- Die Entnahme wird eingeschränkt oder ganz eingestellt, wenn das Fließgewässer zu kühl ist. (Autor: Wie gesagt; was ist zu kühl?)

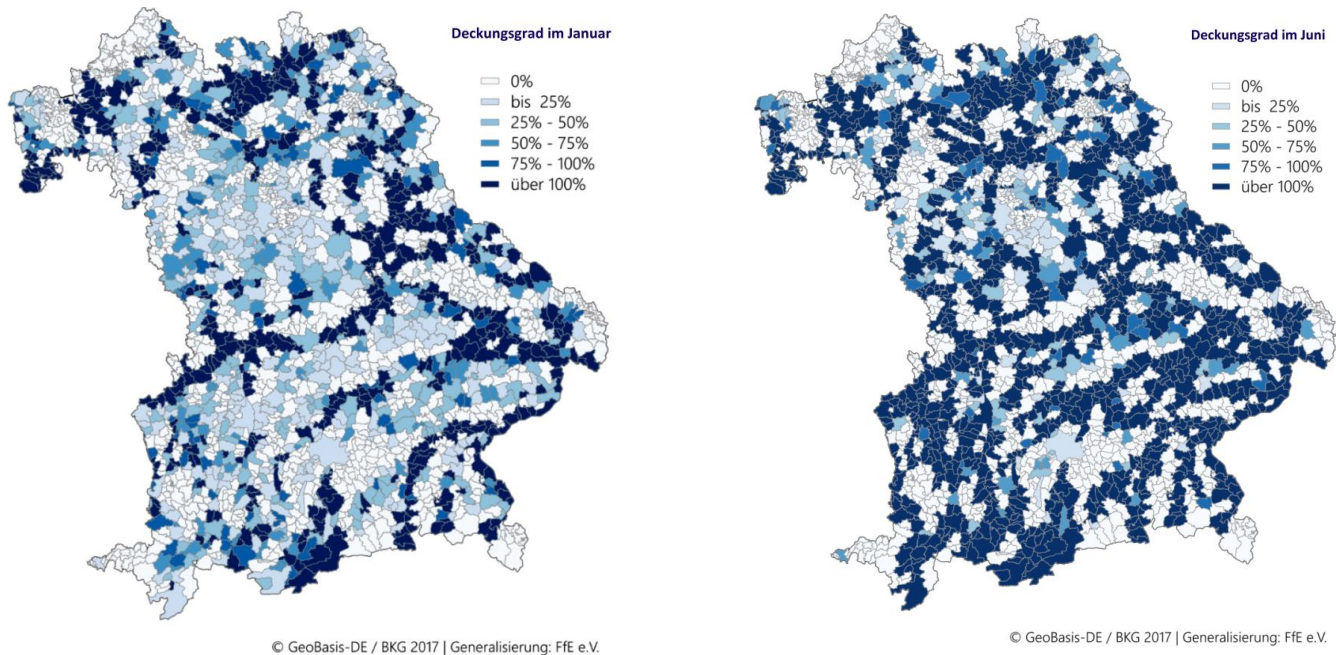
Insgesamt kommt die LEA-Studie zum Ergebnis:

- An ca. 22 Tagen im Jahr (das sind gerade die Kältetage der Heizperiode) sei die Flusswärme gar nicht nutzbar.
- An ca. 80 Tagen (die auch in die Heizperiode fallen) sei die Flusswärme nur eingeschränkt nutzbar.

Es ist klar, dass dann die meisten Kommunen in ihrer Wärmeplanung die Verwendung von Flusswärme erst gar nicht ernsthaft berücksichtigen. Denn wenn diese Aussage der LEA-Studie realistisch ist, dann würde das heißen, für die Mittel- und Spitzenlast in der Heizperiode müsste in andere Wärmequellen investiert werden und für die Grundlast in Übergangszeiten kämen dann die Investition in eine Flusswärmeanlage sozusagen noch obendrauf. Damit würde die Nutzung von Flusswärme geradezu zum Luxus.

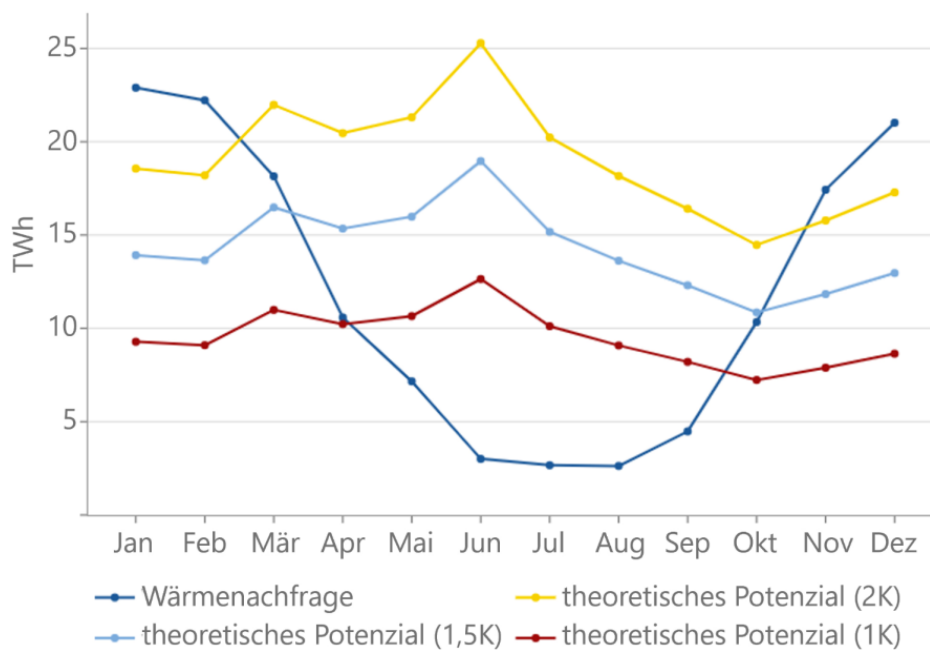
Bayern: Es gibt erhebliche Potenziale

Auch die Studie des FfE Bayern [4] geht davon aus, dass es auf die Abdeckung des Wärmebedarfs im Winter ankommt. Doch bei genauer Hinsicht gibt es laut FfE-Studie auch für die Heizperiode ausreichende Potenziale: „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. ...



© GeoBasis-DE / BKG 2017 | Generalisierung: FfE e.V.

© GeoBasis-DE / BKG 2017 | Generalisierung: FfE e.V.



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 %. Nimmt man nur die Heizperiode Oktober bis März ergibt sich mit 2 K ein Deckungsgrad von gut 80 %.“

Das heißt, mit einer Spreizung von 3 K ließe sich ein Deckungsgrad von 85 % auch im Winter erreichen.

Doch die Studie der FfE bezieht sich nur auf die Temperaturspreizung, bezieht man alle Parameter (Wassermenge, Flusswassertemperatur, Vorlauf­temperatur des Wärmenetzes, Größe des Wärmenetzes etc.) ein, dann sind 90 % und mehr durchaus erreichbar .

Die Entnahme- und Rückgabebedingungen sind variabel

Es kommt, wie wir bereits an anderer Stelle gesehen haben, aber nicht nur auf die Temperaturspreizung im Wärmepumpenkreislauf an. Auch die folgenden Parameter sind wichtig:

- **Wie viel Wasser kann ich entnehmen?**
Entnehme ich statt 10 % der Durchflussmenge 30 %, verdreifacht sich auch die nutzbare Wärmemenge.
- **Wie stark darf ich das Flusswasser abkühlen?**
Kühle ich es statt um 1 K um 3 K ab, verdreifacht sich die Wärmemenge
- **Wie tief darf das Wasser abgekühlt werden?**
 - Um so tiefer die Rückgabetemperatur ist, umso größer ist die Temperaturspreizung im Wärmepumpenkreislauf. Ökologisch ist die erlaubte Temperatur des rückgeführten Wassers nur durch die Abkühlung des gesamten Flusswassers begrenzt.
 - Es gibt oft die Aussage, es müsste einige Grad Sicherheitsabstand zu 0 °C im Wärmepumpenkreislauf eingehalten werden, um ein Vereisen der Wärmetauscher zu verhindern. Das scheint in der Praxis kein Problem zu sein. Angeblich arbeiten z. B. die Wärmepumpen in Mannheim und Zürich auch noch um 1 °C zuverlässig und bei Einsatz der Flüssigstechnologie gibt es dieses Problem nicht.

Wie heiß muss das Wärmenetz sein?

Ein ganz entscheidender Faktor für den Wärmebedarf eines Wärmenetzes, und damit für dessen Abdeckungsgrad durch eine Flusswärmepumpe, ist die Vorlauf-Temperatur im Wärmenetz, wie die Grafik der FfE [4] zeigt:

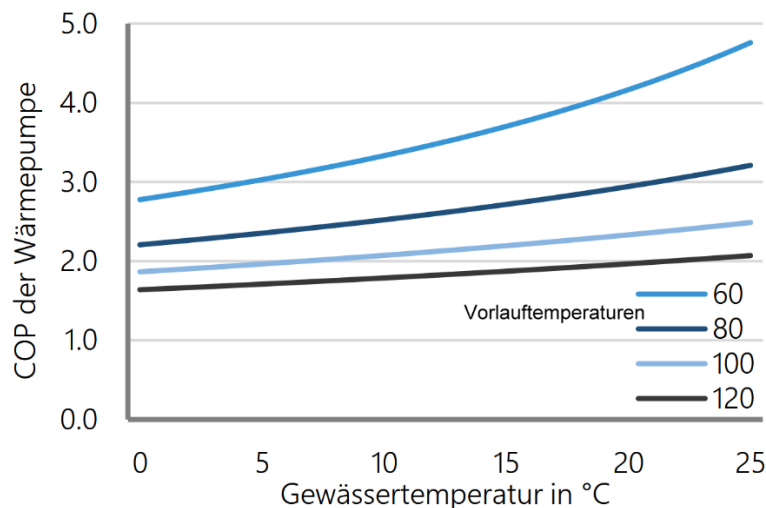


Abb.: aus Wärmepumpen an Fließgewässern FfE (2024)

Auch im Bereich der winterlichen Flusswassertemperaturen, kann in einem 65 °C-Wärmenetz im Vergleich zu einen 90 °C- oder gar 110 °C-Wärmenetz* ein erheblich besserer COP erzielt werden. Das heißt, der Stromverbrauch ist bei gleicher Wärmemenge wesentlich geringer. Das sollte bei der Planung von Wärmenetzen und der Entscheidung für oder gegen Flusswärmenutzung beachtet werden. (* In einem Wärmenetz mit 80 °C Vorlauf­temperatur liegen je nach Wärmebedarf die Temperaturen zwischen 70 °C und 90 °C. Das heißt, im Winter wird die Vorlauf­temperatur zur Abdeckung des Wärmebedarfs eher an der oberen Grenze liegen).

Wirtschaftliche Aspekte bei der Planung von Wärmenetzen mit Flusswärme

Es zeigt sich, dass viele Kommunale Wärmeplanungen zulange Weiternutzungszeiten der fossilen Energieträger einplanen oder andere Wärmequellen wie Biogas und Holz in unrealistischer Weise einplanen. Das führt dann dazu, dass die Investitions- und Betriebskosten für Wärmenetze mit Flusswärme im Vergleich zu vermeintlich günstigeren Wärmequellen oft falsch eingeschätzt werden. Bei genauer Hinsicht müssen bezüglich Ist-Zustand und zukünftiger Versorgungssicherheit jedoch unterschiedliche Situationen unterschieden werden, wobei Flusswärme – soweit lokal verfügbar – fast immer eine gute Perspektive bietet. Auch die Einplanung von Abwärme aus Kraftwerken (KWK) muss in den meisten Fällen als Auslaufmodell eingeschätzt werden, da die zukünftigen Residualkraftwerke nur strombedarfs- und nicht wärmebedarfsgesteuert eingesetzt werden können [176].

Bestehende fossile Verbrennungsanlagen werden durch Flusswärme ergänzt

Beispiele für die Kombination von Verbrennung mit Flusswärme sind z. B. Hannover [32, 33, 34, 35] oder Rosenheim [26, 27]. Diese Kombination erscheint in diesen Fällen erstmal sinnvoll, denn die CO₂-Emissionen werden mit Flusswärme relativ kostengünstig abgesenkt, da dann weniger Kohle, Heizöl oder Erdgas verbrannt werden muss. Aber diese Kombination wird zum Auslaufmodell, denn die fossilen Heizstoffe müssen in absehbaren Zeiträumen ersetzt werden. Alternativ auf CO₂-freie Verbrennung von Wasserstoff zu setzen, erscheint ebenfalls illusorisch. Wasserstoff wird weder in ausreichenden Mengen noch bezahlbar für Heizungszwecke zur Verfügung stehen [186]. Auch KWK, d. h. die Abwärme von Residualkraftwerken wird in Zukunft nur eingeschränkt genutzt werden können, denn der dafür vorgesehene Wasserstoff wird nur für strombedarfsgesteuerten Betrieb reichen. Wärmebedarfsgesteuerter Kraftwerksbetrieb müsste wohl den zu teuer erzeugten Wasserstoff verwenden. Es wird deshalb in allen Fällen nötig sein, mittel- und langfristig eine rein Umweltwärme- und Strom-basierte Lösung sicherzustellen.

Bestehende Biogasanlagen oder Holzverbrennung werden mit Flusswärme ergänzt

Ähnlich ist die Situation, was die Kombination von Biomasse mit Flusswärme betrifft. Bestehende Anlagen erfordern erstmal keine hohen Investitionen für Spitzen- und Notfalllast, so dass Flusswärme tatsächlich eine kostengünstige Ergänzung zum Aufbau oder Ausbau von Wärmenetzen darstellt. Doch billige Abwärme (derzeit um 2 Cent/kWh) aus Biogasanlagen wird es nur geben, solange diese Wärme ein Abfallprodukt von hochsubventioniertem Biogasstrom ist (derzeit bis zu 24 Cent/kWh als Abnahmepreis). Wenn diese Subventionen auslaufen und falls die bestehenden Anlagen flexibilisiert, d. h. strombedarfsgesteuert weiterlaufen, wird mit 10 Cent/kWh für die Abwärme gerechnet. [173, 175]. Und falls der fragwürdige Plan der Bundesregierung, zunehmend Biomethan ins Erdgasnetz einzuspeisen, umgesetzt werden sollte, ist es ohnehin vorbei mit Strom und Abwärme aus Biogasanlagen [175]. Ähnlich ist die Situation bei der Holzverbrennung. Auch wenn die Bundesregierung inzwischen das Gegenteil suggeriert*, Klimawandel bedingt wird auch Brennholz immer knapper und teurer werden. Es wird auch hier in allen Fällen nötig sein, mittel- und langfristig eine rein Umweltwärme- und Strom-basierte Lösung sicherzustellen. (* Nach der desaströsen vierten Bundeswaldinventur 2022/24 – der deutsche Wald war von der CO₂-Senke zur CO₂-Quelle geworden – behauptet nun der im Auftrag von BMLEH und Holzwirtschaft schöngerechnete aktuelle WEHHAM-Bericht das Gegenteil. Hier nur in Kürze: Aufgrund des nötigen Waldumbaus, könne dem Wald wie bisher ca. 60 Mio. m³/a Holz entnommen werden, und der nach wachsende Jungwald binde mehr Kohlenstoff als ein alter Wald. Beides hält einer genauen Überprüfung nicht stand. Denn erst nach 30 Jahren beginnt eine merkliche CO₂-Bindung eines Jungwald und erst nach ca. 70 Jahren wird das Maximum der CO₂-Bindung erreicht. Dazu kommt, dass die Ausfallquote in nachgepflanzten Wäldern durch die zunehmenden Dürreperioden des Klimawandels ansteigt [174, 187]).

Neue Wärmenetze mit Kombination von Biomasse und Flusswärme werden zur Sackgasse

Aus den vorgenannten Gründen wäre es wenig zukunftssicher, neue Wärmenetze auf Grundlage von Flusswärme in Kombination mit Biomasse zu errichten. Denn hier kommen ja nun auch in absehbarer Zeit zusätzlich zur Flusswärme auch die Neuinvestitionen für die Biomasseanlage (i. d. R. wird Holzverbrennung eingeplant) dazu. Das wären aber Investitionen, zu denen mittel- und langfristig zusätzliche Investitionen in Ersatzlösungen dazu kommen werden. Es

wäre als sinnvoll, in diesen Fällen von vorneherein eine verbrennungsfreie, rein Umweltwärme- und Strom-basierte Lösung in Angriff zu nehmen.

Wärmenetze nur bei dichter Bebauung und großer Anzahl angeschlossener Haushalte?

Diese Aussage ist prinzipiell zutreffend, darf jedoch nicht absolut gesehen werden. Denn wir müssen sowohl die Investitionskosten für die Wärmequelle selbst (hier Flusswärme) als auch für den Bau des Wärmenetzes betrachten und dann natürlich die Betriebskosten. Die Investitionskosten für Flusswärmeanlagen sind, wie gesagt, im Vergleich zu Geothermieanlagen i. d. R. deutlich geringer. Und bei den Kosten für den Bau des Leitungsnetzes hängt das stark von den Bedingungen ab, wo und wie tief die Leitungen verlegt werden müssen. Müssen Straßen aufgerissen werden, die bereits voll anderer Leitungen liegen, wird es um ein Vielfaches teurer, als wenn die Leitung für das Wärmenetz z. B. in 50 cm Tiefe entlang des Wegrands oder im Gehsteig gelegt werden können. Dass dies in vielen Fällen auch in weniger dicht bebauten Gebieten funktioniert, haben bereits viele kleine Wärmenetze bewiesen. Das Argument nur bei dicht bebauten Gebieten mit vielen Haushalten komme auch das Geld für die Grundinvestitionen wieder zurück, muss also nach diesen Kriterien in jedem Einzelfall überprüft werden.

Generell sind auch für Flusswärmenetze vollelektrische Lösungen anzustreben

Wie schon das Beispiel des Kanton Zürich zeigt, sind für zukunftssichere Lösungen – auch in Verbindung mit Fluss- oder Seewärme – vollelektrische Lösungen anzustreben. Doch jedes Wärmenetz braucht eine Lösung für Notlast, d. h. eine Ersatzwärmequelle falls die Wärmepumpen ausfallen. Und in vielen Fällen wird auch die Spitzenlastabdeckung durch Flusswärme allein nicht möglich sein.

- **Es gibt keine Alternative zu vollelektrischen Lösungen**

Wie die historischen Beispiele in der Schweiz zeigen, war nie die nutzbare Flusswärmemenge der begrenzende Einsatz für Flusswärmepumpen, sondern das Verhältnis von den Stromkosten zu den Kosten für fossile Brennstoffe. Da wir den Einsatz fossiler Brennstoffe für die Zukunft ausschließen müssen, kommen wir zwangsläufig zu vollelektrischen Lösungen. Was die Wärmeplanung in der Schweiz bereits als selbstverständlich voraussetzt.

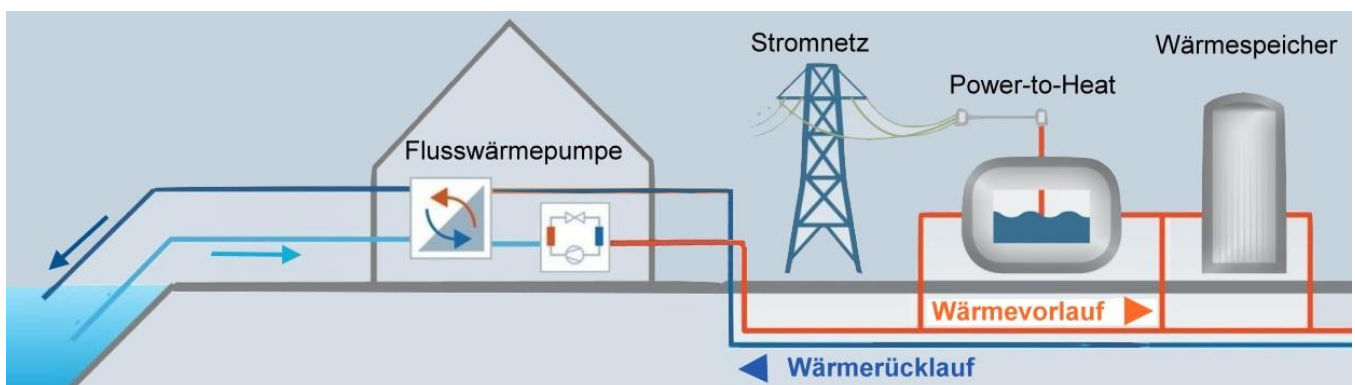
- **Nicht mehr als ca. 10 % Spitzenlastabdeckung durch andere Wärmequellen einplanen**

Wärmenetze mit Flusswärmennutzung sollten so geplant werden, dass unter voller Ausschöpfung des Flusswasserpotenzials (optimal genutzte Flusswassermenge, Temperaturspreizung, Vorlauftemperatur im Wärmenetz etc.) 90 % bis 100% des kompletten Wärmebedarfs abgedeckt werden kann.

- **Power-to-Heat und Wärmespeicher für Spitzenlast und Notfälle**

Power-to-Heat Kessel arbeiten mit Elektroden und das Wasser selbst dient als Heizwiderstand, durch den der Strom fließt. Power-to-Heat Kesseln gibt es heute mit bis zu 60 MW Leistung, in Wärmenetzen arbeiten sie mit Temperaturen bis zu 130 °C. Und Power-to-Heat Kessel können gut mit Wärmespeichern kombiniert werden. Eventuell kann sogar der Power-to-Heat Kessel selbst als Wärmespeicher genutzt werden.

[40, 178, 179]



Ein Flusswasser-Wärmenetz als vollelektrische Lösung

Vorteil: Die Investitionskosten sind bei vollelektrischen Anlagen vergleichsweise günstig

Verglichen mit Verbrennungsanlagen, speziell BHKW, sind die Investitionskosten* in Power-to-Heat Kessel und Wärmespeicherkessel relativ günstig. (* 1 MW BHKW kostet ca. 1 Mio. Euro, 1 MW Power-to-Heat Kessel ca. 100.000 Euro)

„Kleiner“ Haken: Betriebskosten hängen vom Strompreis ab

Derzeit mag in vielen Fällen die Spitzenlastabdeckung durch Strom noch zu teuer erscheinen. Selbst steigende Erdgaspreise relativieren sich, wenn in den kältesten Winterperioden der COP und der Wärmertrag abfällt und der Anteil direkter elektrischer Zuheizung ansteigt. Doch mittel- und langfristig wird Erdgas nicht nur zu teuer werden, sondern vielerorts gar nicht mehr zur Verfügung stehen. Und auch aus Strom erzeugter Wasserstoff wird zum Heizen nicht billiger sein als direkt eingesetzter Strom. Und wie gesagt, auch Biogas und Holz werden mittel- und langfristig nicht mehr ausreichend und in bezahlbarem Umfang zur Verfügung stehen. Heizen mit Strom ist dagegen kein Problem, wenn der Wärmepumpenstrom – wie z. B. in Dänemark (5 Cent/kWh für Wärmenetze und 8 Cent/kWh für private Haushalte) – so kostengünstig ist, dass sich der Bau von Wärmenetzen aus dem Wärmepreis refinanzieren lässt ohne die Kunden zu überlasten.

Voraussetzung für vollelektrische Lösungen ist allerdings ein ausgebautes Stromnetz, das sowohl Wärmepumpen als auch Power-to-Heat Kessel mit ausreichender Leistung versorgen kann. Hierzu muss in den meisten Gebieten Deutschlands das Mittel und Hochspannungsnetz um den Faktor 2 bis 3 ausgebaut werden. [178]

Danksagung

Mein Dank gilt den Kolleg:innen der S4F, die mich mit Kritik und Hinweisen unterstützten, insbesondere Thomas Seifert, Jens Clausen, Urike Jordan, Kerstin Kranich und Volker Ossenkopf.

Quellen

1. Grüne Nah- und Fernwärme aus Fließgewässern – Untersuchung für die 80 Großstädte in Deutschland; (11.2024); Christian Seidel, Lars Ostermann, TU Braunschweig; https://www.efzn.de/fileadmin/Sites/EFZN/Documents/efzn-Foerderung_2022-23/2024-12-Abschlussbericht-Hydro2HEAT.pdf
2. AGO; (2022, September 7); AGO Calora Flusswärmepumpe leistet Beitrag zur Energietransformation; Zugriff am 22.12.2024; Verfügbar unter: <https://www.ago-energie.de/news-presse/news/ago-calora-flusswaermepumpe-leistet-beitrag-zur-energietransformation>
3. Energie-Atlas Bayern; Gewässerthermie; (Stand 02.2026); Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie; https://www.karten.energieatlas.bayern.de/start/?c=598213,5425775&z=8&r=0&l=atkis,2825d903-9f99-4d62-9eab-bd887034be31,d5ea2f0c-1e64-40b3-aa4b-bb8eae7a5e55&l_o=0.82,1,1&t=abwaerme&cnids=15&mid=0
4. Wärmepumpen an Fließgewässern – Analyse des theoretischen Potenzials in Bayern; (2024); FfE; <https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2024/05/Waermepumpen-an-Fliessgewaessern.pdf>
5. Wärmebereitstellung durch Flüsse, Kläranlagen sowie Abfall- und Reststoffe in Hessen – Wärmequellen Hessen: WQ.Hessen; (12.2025); Jordan et al. Uni Kassel, Hrsg. LEA; https://redaktion.hessen-agentur.de/publication/2026/4560_260318_Abschlussbericht_WQHessen_final_id_7281_02.pdf
6. Laufwasser-Wärmepumpen – Technik & Wirtschaftlichkeit; (1980): Rumpf, H.-G. in *elektrowärme international* (38), S. 229;
7. Geschichte der Wärmepumpe – Schweizer Beiträge und internationale Meilensteine; (2008); Martin Zogg für Bundesamt für Energie BFE der Schweiz; <https://www.zoqq-engineering.ch/publi/geschichtewp.pdf>;
8. Wärmerückgewinnung an Flüssen; (15.05.2025); energieukunft; <https://www.energieukunft.eu/erneuerbare-energien/waermewende/buerokratie-gefaehrdet-flusswaerme-projekte#:~:text=W%C3%A4rmer%C3%BCckgewinnung%20an%20Fl%C3%BCssen:%20B%C3%BCrokratie%20gef%C3%A4hrdet%20Flussw%C3%A4rme%20Projekte.%20Luftaufnahme,Stadtteil%20Niehl%20versorgt%20die%20K%C3%B6lner%20Innenstadt%20mit;>
9. Zu viel Bürokratie gefährdet klimafreundliche Flusswärme-Projekte; (14.05.2025); Scientists for Future; [https://de.scientists4future.org/zu-viel-buerokratie-gefaehrdet-klimafreundliche-flusswaerme-projekte/;](https://de.scientists4future.org/zu-viel-buerokratie-gefaehrdet-klimafreundliche-flusswaerme-projekte/)
10. Umweltwärme aus Oberflächengewässern: Hemmnisse und Potenziale; (03.5.2024); KEAN; <https://www.klimaschutz-niedersachsen.de/aktuelles/Umweltwaerme-aus-Oberflaechengewaessern-Hemmnisse-und-Potenziale-3846;>
11. Flusswärmepumpe; (04.2023); BÜRGER BEGEHREN KLIMASCHUTZ; https://klima-und-demokratie.de/wp-content/uploads/2023/06/02_Flusswaermepumpe_Factsheet_BBK.pdf;
12. Innovative Wärmeversorgung aus Tagebaurestseen; (2021); Innovationsregion Mitteldeutschland; https://transformationsregion-mitteldeutschland.com/wp-content/uploads/2021/07/20210723_Schlussbericht-See thermie_Langfassung.pdf
13. Bottom-Up Studie zu Pfadoptionen einer effizienten und sozialverträglichen Dekarbonisierung des Wärmesektors; (2022); Fraunhofer ISE, Fraunhofer IEE (Hrsg.); https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2022/221222_Bottom_Up_Studie_finally-1.pdf;
14. Eine Einführung in die Wärmegewinnung aus Flusswasser, Leitfaden; (2025); Seidel, C., Ostermann, L. & Clausen, J. ; Berlin: Borderstep Institut; <https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2025/05/29-05-2025-Flusswasserwaermepumpen.pdf>
15. Werden bei der Befürwortung von Flusswärmepumpen durch S4F ökologische Gesichtspunkte genügend berücksichtigt?; (12.2025); persönliche Anfrage von Frauke Bodino;
16. Grundlagen und Leitlinien für eine ökologisch verträgliche thermische Nutzung von Gewässern; (01.2025); Ursula Riedmüller (BNÖ) & Dieter Leßmann (BTU); LAWA – LFP 2023, Projekt O 5.23; https://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/static/LFP/Dateien/LAWA/AO/LAWA-O5_23_Studie-Gewthermie.pdf
17. Flüssigeis zur Kälte- und Wärmeversorgung; (2017); ILK Dresden; https://www.ilkdresden.de/fileadmin/user_upload/170130_Broschuere_Vakuumeis_de.pdf

18. Seewasserverbunde Zürich; (Stand 04.2026); Elektrizitätswerk der Stadt Zürich;
<https://www.ewz.ch/de/geschaeftskunden/immobilien/referenzen-projekte/seewasserverbunde-zuerichsee.html>
19. Machbarkeitsstudie – Thermische Nutzung Bodensee und Rhein: (2021); Kanton Thurgau CH;
https://www.ekt.ch/fileadmin/user_upload/newsroom/Stories/Machbarkeitsstudie_Thermische_Nutzung_Bodensee_Rhein.pdf
20. THERMISCHE NUTZUNG VON SEEN UND FLÜSSEN; (2018); Gaudard et al. in AQUA & GAS 2/2018;
https://www.researchgate.net/profile/Alfred-Wuest/publication/326357182_Thermische_Nutzung_von_Seen_und_Flussen_-_Potential_der_Schweizer_Oberflachengewasser/links/5d3a897ba6fddc370a605c77/Thermische-Nutzung-von-Seen-und-Fluessen-Potential-der-Schweizer-Oberflaechengewasser.pdf?cfchlftk=qb5L0MpatWtsCNr0C1F6rn7HKuYkq8weja2U51uqPnM-1776331533-1.0.1.1-O3RhRUjD_BVqgh5HNISDfb4DKFIVK2IxU00zIR4YUkw
21. Wärmenutzung von Seen und Fließgewässern; (stand 04.2026); eawa, Das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs; <https://thermdis.eawaq.ch/de>
22. Karten der Schweiz – Potenzila Wärmenutzung Gewässer; Schweizerische Eidgenossenschaft; (stand 04.2026);
<https://map.geo.admin.ch/#/map?lang=de¢er=2610723.69,1249528.91&z=2.891&topic=ech&layers=ch.bfe.waermepotential-gewaesser@features=353&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe&featureInfo=default&catalogNodes=ech>
23. Collectieve warmteprojecten; (Stand 04.2026); HIER Nederlande; <https://www.hier.nu/lokale-energie-monitor-2025/warmte#omvang-warmteprojecten>
24. Flusswärmepumpen; (Stand 04.2026); MVV Energie AG;
<https://www.mvv.de/ueber-uns/unternehmensgruppe/mvv-umwelt/aktuelle-projekte/flusswaermepumpen>
25. Wärme- und Kältekonzepte mit Großwärmepumpen; (2022); Bundesverband Wärmepumpe (BWP);
https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/waermepumpe/08_Sonstige/Filedump/BWP_A4_GrossWP_web_mail.pdf
26. DEKARBONISIERUNG DER WÄRME BIS 2045; (10.2025); Powerbladl der Stadtwerke Rosenheim;
<https://www.swro.de/sites/default/files/documents/2025-12/stadtwerke-rosenheim-powerbladl-04-2025-web.pdf>
27. Kraft-Wärme-Kopplung; (Stand 04.2026); Stadtwerke Rosenheim ;
<https://www.swro.de/de/unternehmen/erzeugungsanlagen/kraft-waerme-kopplung>
28. Wasser der Weser liefert Wärme und Kälte für Stadtquartier; (22.05.2025); energieukunft.eu;
<https://www.energieukunft.eu/erneuerbare-energien/waermewende/wasser-der-weser-liefert-waerme-und-kaelte-fuer-stadtquartier>;
29. FACTSHEET: ENERGIEKONZEPT ÜBERSEEINSEL; (Stand 04.2026); Stadt.Energie.Speicher;
<https://www.stadt-energie-speicher.de/wp-content/uploads/2025/04/Stadt-Energie-Speicher-Factsheet-Energiekonzept-Ueberseeinsel-1.pdf>
30. Flusswasserwärmepumpe Überseeinsel, Bremen; (10.2025); Leon Kirsch für Stadt.Energie.Speicher; KEAN;
https://www.klimaschutz-niedersachsen.de/downloads/Veranstaltungsdokumente/Stadt.Energie.Speicher_BDEW-KEAN.pdf
31. Das Fließgewässerpotenzial in den 80 deutschen Großstädten; (02.2025); Technische Universität Braunschweig, Arbeitsgruppe Regenerative Energien, Institut für Statik und Dynamik der TU Braunschweig; https://kus-stuttgart.de/wp-content/uploads/2026/02/Muenchen-IHK-1_Das-Fliessgewaesserpotential-in-80-dt-Grossstaedten.pdf ;
32. FLUSSWASSER GROßWÄRMEPUMPE DER ENERCITY ZUR GEWINNUNG REGENERATIVER FERNWÄRME; (13.05.2025); THOMAS BRIDDIGKEIT für enercity; <https://erica-ingenieure.de/wp-content/uploads/2025/05/03-Grosswaermepumpe-enercity-V01.pdf>
33. Wärmeplanung Hannover; (04.2026); Landeshauptstadt Hannover Fachbereich Umwelt und Stadtgrün;
<https://www.hannover.de/Leben-in-der-Region-Hannover/Umwelt-Nachhaltigkeit/Klimaschutz-Energie/Klimaschutz-konkret/W%C3%A4rmewende-Hannover/W%C3%A4rmeplanung-Hannover>
34. Karten der Wärmeplanung Hannover 2025; (Stand 27.03.2025); Landeshauptstadt Hannover; <https://stadtmodell-prod4.hannover-stadt.de/DT4/#/iframe>
35. Wärmewende Hannover; (stand 04.2026); enercity, <https://www.enercity.de/waermewende>;

36. EEW ENERGY FROM WASTE HANNOVER GMBH LIEFERT WÄRME; (02.2018); EEW;
<https://www.bvse.de/verwertung/nachrichten-altholz-ersatzbrennstoffe-bioabfall/2749-eew-energy-from-waste-hannover-gmbh-liefert-waerme.html>
37. Neues Biomasseheizkraftwerk liefert grüne Fernwärme für Hannover; (28.10.2025); energie.de;
<https://www.energie.de/euroheatpower/news-detailansicht/nsctrl/detail/News/neues-biomasseheizkraftwerk-liefert-gruene-fernwaeirme-fuer-hannover>;
38. Das Biomasse-Heizkraftwerk in Stöcken; (Stand 04.2026); enercity;
<https://www.enercity.de/waermewende/biomasse-heizkraftwerk-stoecken>
39. Waldzustand und Holznutzung national und international; (10.2024); Michael Huber FG Kommunalen Klimaschutz Scientists for Future; https://de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/3/2024/10/Kurz Dossier-Waldzustand-und-Holznutzung-national-und-international-DocHu_V2_10_2024.pdf
40. Holzverbrennung ersetzt nicht grünen Strom am Beispiel Bützfleth; (11.2025), Michael Huber Bündnis Ausgebrannt; https://ausgebrannt.org/wp-content/uploads/2025/11/Michael-Huber_Papier_zu_Biomasse_in_Buetzfleth.pdf
41. Wärmeversorgung Celler Badeland: (02. 2026); Präsentation, Prof. K. Reinicke ITE TU Clausthal
42. Einsatz von Groß-Wärmepumpen; (Stand 04.2026; Kälte Klima Aktuell KKA; https://www.kka-online.info/artikel/kka_Einsatz_von_Gross-Waermepumpen-1241253.html
43. Flusswärmepumpe – wie die Murg für warme Wohnungen; (03.2023); EnBW;
<https://www.enbw.com/unternehmen/themen/klimaschutz/flusswaermepumpe.html>;
44. Thermische Energie aus Seen und Flüssen; (01.2023); Marcel Zieger ewz Elektrizitätswerk der Stadt Zürich; in Aqua & Gas ; https://www.aquaetgas.ch/energie/fernw%C3%A4rme/20230131_aq2_thermische-energie-aus-seen-und-fl%C3%BCssen/
45. Potenzial der Seen und Flüsse für Wärmeentzug und Wärmeeinleitung – Dokumentation; BFE CH; (2021); <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/news-und-medien/publikationen.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2Y2qVZGUvcHVibGlyYX/Rpb24vZG93bmXvYWQvMTA2NDc=.html>
46. Nutzung von Oberflächengewässer für thermische Netze; (2017); BFE;
<https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/8797>
47. Errichtung eines Steinkohlekraftwerks am Standort Brunsbüttel, Kreis Dithmarschen - FFH-Verträglichkeitsuntersuchung; (2008); ARSU im Auftrag Electrabel Kraftwerk Brunsbüttel, http://data.bi-unterelbe.net/Daten/pdf/Electrabel/Anlage_4_11.pdf
48. Gutachten zur Feststellung und Beurteilung von Fischschädigungen durch den Betrieb der Kühlwasserentnahmebauwerke der Kraftwerke Herrenhausen und Linden; (2015); BIOCONSULT im Auftrag der Stadtwerke Hannover;
https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/106650/90_Anlage_7_-_BIOCONSULT_Kuehlwasser_Bericht_zu_Fischschaeden.pdf
49. Wasserrechtliches Erlaubnisverfahren Kraftwerk Herrenhausen und Heizkraftwerk Linden – Naturschutzfachliche Unterlagen; (2016); ARSU im Auftrag der Stadtwerke Hannover;
https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/106663/30_Anlage_1_-_ARSU_Teil_A.pdf
50. Wasserrechtliche Bewilligung zur Entnahme von Wasser aus dem Dortmund-Ems-Kanal für das Speicherbecken Geeste bei Lingen, Gewässerökologisches Gutachten (GÖK); (2016); ARSU im Auftrag Kernkraftwerk Emsland in Lingen; https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/115380/Anlage_12_-_Gewaesseroekologisches_Gutachten.pdf;
51. Gewässergüte 1986 - 2000 in Südniedersachsen und Lüneburger Heide; (2004); NLWK;
https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/70021/Gewaesserquete_in_Suedniedersachsen_1986-2000.pdf
52. Thermische Belastung von Gewässern durch Kernkraftwerke – Beschluß des Deutschen Bundestages vom 2. Dezember 1971, - Drucksache V1/2826; (1971); Der Bundesminister des Innern;
<https://dserver.bundestag.de/btd/06/030/0603052.pdf>
53. Stellungnahme des Landessportfischerverbandes Schleswig-Holstein e.V. zum Antrag nach Wasserhaushaltsgesetz (WHG) im Rahmen des Kraftwerksneubaus am Standort Brunsbüttel durch die Electrabel Kraftwerk; (2009); https://lav-sh.de/wp-content/uploads/2019/01/Stellungnahme_KKWElectrabel.pdf
54. Kühlwassernutzung; (Stand 04.2026) LfU Bayern;
https://www.lfu.bayern.de/wasser/thermische_nutzung_gewaesser/kuehlwassernutzung/index.htm

55. UVP-Bericht zur Errichtung und zum Betrieb eines erdgasbefeuerten Kraftwerkes der Kraftwerk Mehrum GmbH; (2023); TÜV NORD; https://www.uvp-verbund.de/documents-igq-ng/igq_ni/8aa50135-8a84-4107-8510-4ef885430b90/UVP-Bericht_07-08-23.pdf
56. Massnahmen zum Schutz der Krebse und Fische bei Trockenheit und Hitzeperioden; (2023); Kanton Aargau, Florian Randegger, Jonas Ruckli DEPARTEMENT BAU, VERKEHR UND UMWELT; <https://www.ag.ch/media/kanton-aargau/bvu/umwelt-natur/fischerei/informationen-fuer-fischer/notfallkonzept-trockenheit-und-hitze.pdf>,
57. Wie Mikroplastik es bis in die Arktis schafft; (01.2024); MPG, MPI für Dynamik und Selbstorganisation; https://www.ds.mpg.de/4045870/240109_shape_matters
58. Mikroplastik und Chemikalien in der Antarktis; (2018); Greenpeace; https://greenpeace.at/uploads/2025/01/greenpeace-studie_mikroplastik-und-chemikalien-in-der-antarktis.pdf
59. Deposition of PFAS 'forever chemicals' on Mt. Everest; K.R. Miner, H. Clifford, T. Taruscio, M. Potocki, G. Solomon, M. Ritari, I.E. Napper, A.P. Gajurel, P.A. Mayewski in Science of The Total Environment, Volume 759, 10 March 2021, 144421; <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720379523?via%3Dihub>
60. Ökologischer Zustand der Fließgewässer; (Stand 10.2022); UBA; <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/fliessgewaesser/oeekologischer-zustand-der-fliessgewaesser>
61. Bewertungsinstrumente der EG-Wasserrahmenrichtlinie - Ökologischer Zustand; (11.2023); UBA; <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/fluesse/ueberwachung-bewertung/biologisch#:~:text=Der%20C3%B6kologische%20Zustand%20eines%20Flusses,St%20C3%B6rqr%20C3%B6%20in%20einem%20Gew%20C3%A4s%20wider.>
62. ZUSTAND DER GEWÄSSER IN DEUTSCHLAND; (2018); WWF; https://www.wwf.de/fileadmin/user_upload/WWF-Report-Zustand-der-Gewaesser-Deutschland-Langfassung.pdf
63. Flüsse in Niedersachsen in besonders schlechtem Zustand; (21.03.2025); NDR; <https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/Fluesse-in-Niedersachsen-in-besonders-schlechtem-Zustand,wasseratlas106.html>
64. Fließgewässerentwicklung – Überblicksinformation; (stand 04.2026); Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN); <https://www.nlwkn.niedersachsen.de/startseite/wasserwirtschaft/fliessgewaesserentwicklung/fliegewaesserentwicklung-ueberblicksinformation-138349.html>
65. Sind die niedersächsischen Oberflächengewässer in einem schlechten Zustand?; (2018); Niedersächsische Minister für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz; https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/aktuelles/niedersaechsischer_landtag_mundliche_anfragen/sind-die-niedersaechsischen-oberflaechengewaesser-in-einem-schlechten-zustand-163671.html
66. Wassertemperatur von Fließgewässern; (Stand 11.2023); UBA; <https://www.umweltbundesamt.de/monitoring-zur-das/handlungsfelder/wasserhaushalt/ww-i-10/indikator>;
67. Wassertemperatur Bayern; LfU Bayern; <https://www.nid.bayern.de/wassertemperatur>
68. Gewässerkundlicher Jahresbericht 2018 – Wassertemperatur der Flüsse; LfU Bayern; https://www.lfu.bayern.de/wasser/gewaesserkundlicher_jahresbericht_2018/fluesse/flusswassertemperatur/index.htm;
69. Auswirkungen auf die Gewässertemperatur; (Stand 04.2026); LfU Bayern; https://www.lfu.bayern.de/wasser/klimawandel_wasserhaushalt/auswirkung_auf_wasserhaushalt/gewaessertemperatur/index.htm;
70. Simulation of the effects of climate change scenarios on future Rhine water temperature development – update IPCC AR5 – International; (07.2025); International Commission for the Protection of the Rhine; https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/DE/rp_DeFrNIEn_0302.pdf
71. Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz; (11.2023); Hrsg. Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie SGHL, Schweizerische Hydrologische Kommission Chy der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz SCNAT; <https://www.bafu.admin.ch/dam/it/sd-web/hVR2FJxQ6TfY/auswirkungen-des-klimawandels-auf-die-wasserwirtschaft-der-schweiz.pdf>;
72. Parameterblatt Wassertemperatur; (2021); NLWKN; <https://nlwkn.niedersachsen.de/download/192332>;
73. Indikator-Factsheets zum Handlungsfeld Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft; (11.2023), UBA; https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/5612/dokumente/ww-i-10_indikator_wassertemperatur_fluesse.pdf

74. *Temperatur- und Sauerstoff-Toleranz ausgewählter Wanderfischarten der Elbe*; (2008); Institut für Binnenfischerei e.V. Potsdam-Sacrow; https://www.fgg-elbe.de/tl_files/Download-Archive/Fachberichte/Sauerstoffhaushalt/08FischO2toleranz.pdf
75. *Wassertemperatur und Sauerstoff in Oberflächengewässern ; Hintergrund-Informationen für eine thermische Nutzung*; (10.2024); Ingrid Carmienke, Sächsische Akademie der Wissenschaften, Kommission Umweltprobleme; Im Internet nicht mehr verfügbar
76. *Gewässergütekarte der Landeshauptstadt Hannover 2023 – Erläuterungsbericht*; Arbeitsgemeinschaft Limnologie und Gewässerschutz (ALG) e. V. Hannover in Kooperation mit der Landeshauptstadt Hannover Fachbereich Umwelt und Stadtgrün, Bereich Umweltschutz; <https://www.hannover.de/content/download/1028258/file/Erl%C3%A4uterungsbericht%202023.pdf>
77. *Sechs Tonnen tote Tiere Sauerstoffmangel wohl Ursache für Fischsterben*; (20.08.2024); NDR; https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/oldenburg_ostfriesland/Sechs-Tonnen-tote-Tiere-Starkregen-sorgt-offenbar-fuer-Fischsterben,fischsterben510.html
78. *Wissen zum Thema: Sauerstoff im Wasser*; (03.2.2020); SS; https://globe-swiss.ch/files/Downloads/1702/Download/Wissen%20zum%20Thema%20Sauerstoff_Zyklus3.pdf
79. *Vollzug des Alarmplan bayerische Donau Gewässerökologie (ADÖ)*; (2021); Niedrigwasser-Informationsdienst Bayern; https://www.nid.bayern.de/files/berichte/Alarmplan_bayerische_Donau_Gewaesseroekologie.pdf
80. *Umkippende Gewässer & Fischsterben*; (Stand: 09. August 2024); Deutsche Umwelthilfe; https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Fischereidialog_Ostsee/Factsheet_Umkippende_Gew%C3%A4sser_Fischsterben_20240809.pdf
81. *Auswirkungen der Gewässererwärmung auf die Physiologie und Ökologie der Süßwasserfische Bayerns*; LfU Bayern; https://www.lfu.bayern.de/wasser/klimawandel_wasserhaushalt/auswirkung_auf_wasserhaushalt/gewaesseroekologie/index.htm
82. *Entwicklung der ökologischen Beschaffenheit von Oberflächengewässern im Klimawandel*; (2022); UBA; <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-oekologischen-beschaffenheit-von>
83. *Biologische Gewässeranalyse – von der Gewässergüte zum ökologischen Zustand*; (2007); LfU Bayern; https://www.lfu.bayern.de/wasser/gewaesseraqualitaet_fluesse/untersuchungsprogramme/doc/biologische_gewaesseraanalyse.pdf
84. *Sauerstoffhaushalt der Tideelbe*; (2014); KLS im Auftrag der Hamburg Port Authority (HPA); https://www.kuestendaten.de/media/zdm/kuestendaten/publikationen/Datencontainer/S/Synopse Teil B Prozess_e_Sauerstoffhaushalt.pdf
85. *Gewässerökologische Studie der Elbe von Schnackenburg bis zur See*; (1984); ARGE ELBE; https://www.fgg-elbe.de/files/Download-Archive/Fachberichte/Biomonitoring_allgemein/84Oekostudie.pdf
86. *Die Sauerstoffentwicklung in der Tideelbe in den Jahren 2011–2024*; (2025); TIB – Leibniz-Informationszentrum Technik und Naturwissenschaften und Universitätsbibliothek; <https://oa.tib.eu/renate/bitstreams/949c8745-6a36-4321-a11f-cf41c0bc83ac/download>
87. *Biologische Untersuchung der Limmat zwischen Zürichsee und Aare*; (2020); HYDRA im Auftrag Kanton Aargau und Kanton Zürich; https://www.hydra-institute.com/images/Publikationen/2020_Biologische_Untersuchungen_Limmat_2020.pdf
88. *Glatzel, Wolf-Dieter; Heise, Klaus-Dieter (Hg.) (1980): Wärmepumpen und Gewässerschutz. Ökologische Auswirkungen von Wärmepumpen mit Wärmeentzug aus Wasser; Berichtsband zum Statusseminar am 19. und 20. November 1979 im Reichstagsgebäude in Berlin ; [Tagungsbericht und Auswertung ...]. Deutschland; Statusseminar Wärmepumpen und Gewässerschutz; Wärmepumpen und Gewässerschutz. Berlin: E. Schmidt; <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/server/api/core/bitstreams/4bbb8ca5-c8e2-401e-a4de-2f184c702ceb/content>*
89. *Forellen und Äschen verschwinden in rasendem Tempo aus der Limmat*; 2019; Badener Tagblatt; <https://www.badenertagblatt.ch/aargau/baden/forellen-und-aschen-verschwinden-in-rasendem-tempo-aus-der-limmat-forscher-stehen-vor-ratsel-ld.1348098>
90. *Kantonale Fischereistatistik 2024*; (2025); Kanton Aargau; <https://www.aq.ch/media/kanton-aargau/bvu/umwelt-natur/fischerei/statistiken/auswertung-fischfangdaten-fischereibericht2024.pdf>
91. *Überlebensstrategien der heimischen Tierwelt in kalten Gewässern*; (27.12.23); gwf Wasser | Abwasser <https://gwf-wasser.de/forschung-und-entwicklung/ueberlebensstrategien-der-heimischen-tierwelt-in-kalten-gewaessern/>

92. *Weder still noch starr*; (05.01.2924); Leibniz-Instituts für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB); <https://www.leibniz-gemeinschaft.de/ueber-uns/neues/forschungsnachrichten/forschungsnachrichten-single/newsdetails/still-und-starr-ruht-der-see>
93. *Temperaturverlauf in Fließgewässern*; (2020); BAFU CH / Sektion Lebensraum Gewässer; https://wa21.ch/wp-content/uploads/2021/09/Bericht-Temperaturverlauf-in-Fließgewässern-2020-12-07_korr.pdf
94. *Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer*; (2012); BAFU CH; https://www.axpo.com/content/dam/axpo19/master/files-master/magazine/renewable-energy/2106_Paper-Umwelt-Wissen.pdf
95. *Wassertemperatur Würzburg / Main vom 01.11.1980 bis zum 21.04.20*; (Stand 04.2026); LfU Bayern; https://www.gkd.bayern.de/de/fluesse/wassertemperatur/main_unten/wuerzburg-24042000/gesamtzeitraum?zr=gesamt&beginn=01.11.1980&ende=21.04.2026
96. *Wassertemperatur von Fließgewässern 1971 bis 2023*; (Stand 04.2026); https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/K/klimaschutz/Downloads/download_faktenblatt/wassertemp.pdf?blob=publicationfile&v=1
97. *Langfristige Trendermittlung zur Wassertemperatur der Leine*; (2011); NLWKN; https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/70042/Langfristige_Trendermittlung_zur_Wassertemperatur_der_Leine-Orientierende_Betrachtungen_zum_Klimawandel_...._Ausgabe_4_2011.pdf
98. *Langzeitverhalten der Wassertemperaturen bayerischer Fließgewässer*; (2013) LfU Bayern; https://www.bestellen.bayern.de/med/97847810-b4a5-11f0-81ee-c3fc7d0a3316/4b0e6a70-1059-11d9-4c85-9d915831e9eb/0/lfu_was_00090.pdf
99. *Entwicklung der Rheinwassertemperaturen von 1978 bis 2023*; (2024; Internationale Kommission zum Schutz des Rheins IKSR); https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/DE/rp_De_0301.pdf
100. *Thermische Nutzung von Oberflächengewässern*; (2012); Florian Schwinghammer, Masterarbeit am Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg; https://www.hydrology.uni-freiburg.de/abschluss/Schwinghammer_F_2012_MA.pdf
101. *Flusswärmepumpen*; (Stand 04.2026); MVV Energie AG; <https://www.mvv.de/ueber-uns/unternehmensgruppe/mvv-umwelt/aktuelle-projekte/flusswaermepumpen>
102. *Wärmeenergetische Leistungsfähigkeit ausgewählter Fließgewässer*; (2017); Jessika Gappisch Bachelorarbeit am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Darmstadt; <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/server/api/core/bitstreams/4bbb8ca5-c8e2-401e-a4de-2f184c702ceb/content>
103. *Einleitbedingungen in Fließgewässern optimieren*; (2023); IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung; https://kontrisol.de/wp-content/uploads/2023/03/Einleitbedingungen-in-Fließgewässern-optimieren-Abschlussbericht-Teilarbeitspaket-4.4_compressed.pdf
104. *Präzisierung von Qualitätszielen im Falle einer Anwendung bei der Einleitung aus Punktquellen*; (2004); Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Technische Universität Wien; https://dafne.at/content/report_release/8e995ca5-a08f-4308-b095-ad3ee55563eb_0.pdf
105. *Betreiberhinweise zur Planung, Genehmigung und Betrieb von Wärmetauscheranlagen – Wärmegewinnung aus Fließgewässern*; (2025); LfU Bayern; https://www.lfu.bayern.de/publikationen/get_pdf.htm?art_nr=lfu_was_00364
106. *Impacts of using lakes and rivers for extraction and disposal of heat*; (2018); Gaudard, Adrien & Weber, Christine & Alexander, Timothy & Hunziker, Stefan & Schmid, Martin; Wiley Interdisciplinary Reviews: Water. 5. e1295. 10.1002/wat2.1295; https://www.researchgate.net/publication/325338601_Impacts_of_using_lakes_and_rivers_for_extraction_and_disposal_of_heat
107. *Fischwanderungen in Binnengewässern – Konzepte, Begriffe und Beispiele*; (2003); Anne Wagner & Roland Lemcke in *Mitteilungen der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg*; https://www.landwirtschaft-mv.de/static/LFA/Dateien/Hefte/MdLFA_Heft29.pdf
108. *Das wechselvolle Leben der Fische*; (2014); Hans Langer; https://www.umwelt.uni-hannover.de/fileadmin/umwelt/Publikationen/Schriftenreihen/Arbeitsmaterialien/11_Das_wechselvolle_Leben_der_Fische.pdf
109. *Phänomen Fischwanderung*; (2020); Eva Baier; naturschutz.ch; <https://naturschutz.ch/hintergrund/wissen/phaenomen-fischwanderung/143639>

110. *Ökologische Grundlagen und Standortevaluation für die Realisierung des Prototyps eines Fischpasses*(2013); Eva Baier Bachelorarbeit an der ETH Zürich in Kooperation mit eawag aquatic research; http://fischwanderung.ch/wp-content/uploads/2013/12/Bachelorarbeit_ohneAnhang.pdf
111. *Effect of bed morphology on flow mixing length at river confluences*; (1995); Gaudet, J., Roy, A.. *Nature* 373, 138–139 (1995). <https://doi.org/10.1038/373138a0>
112. *River confluences: What determines mixing dynamics?*; (2022); Water Institute Research University of Waterloo; <https://uwaterloo.ca/water-institute-research/issue-16/faculty-environment/river-confluences-what-determines-mixing-dynamics>
113. Zhi, W., Klingler, C., Liu, J. et al.; *Widespread deoxygenation in warming rivers*; *Nat. Clim. Chang.* 13, 1105–1113 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01793-3>
114. *Complex and nonlinear climate-driven changes in freshwater insect communities over 42 years*; (2020); Baranov, V., Jourdan, J., Pilotto, F., Wagner, R. and Haase, P.; *Conservation Biology*. Accepted Author Manuscript. doi:10.1111/cobi.13477; <https://conbio.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/cobi.13477>
115. *Impacts of entrainment and impingement on fish populations: A review of the scientific evidence*; (2013); Lawrence W. Barnthouse; *environmental Science & Policy*, Volume 31, 2013, Pages 149-156; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462901113000488>
116. *WATER INTAKE RECOMMENDATIONS*; (Stand 04.2026; nited States Environmental Protection Agency EPA; <https://www.fws.gov/sites/default/files/documents/water-intake-recommendations.pdf>
117. *Untersuchung zum Stand der Technik von Fischschutzanlagen und Fischschutzsystemen*; (2013); Oliver Wessel Bachelor-Arbeit HAW Hamburg; https://reposit.haw-hamburg.de/bitstream/20.500.12738/6390/1/WesselOliverBA_geschw%c3%a4rzt.pdf
118. *Migration of Freshwater Fishes*; (2001); Martyn C. Lucas, Etienne Baras, Timothy J. Thom, Annie Duncan, Ondrej Slavík; <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470999653>
119. *Reinigung von Rohrleitungen und Wärmeübertragernindustriellen Kühlkreisläufen*; (Stand 04.2026); *Chemie Technik*; <https://www.chemietechnik.de/energie-umwelt/reinigung-von-rohrleitungen-und-waermeuebertragernindustriellen-kuehlkreislaeufen/1932814>
120. *INDUSTRIEREINIGUNG MIT HOCHDRUCKWASSERTECHNIK – LÖSUNGEN FÜR KRAFTWERKE*; (Stand 04.2026); Ortlieb Hochdruckwassertechnik; <https://www.ortliebhdw.de/kraftwerke-hochdruckreinigung>
121. *Rohrleitungen reinigen*; (Stand 04.2026); Märtens Industrie-Service; <https://www.maertens-industrie-service.de/rohrleitungen-reinigen>
122. *RISIKOABSCHÄTZUNG FÜR AMMONIAK ALS KÄLTEMITTEL WAHRSCHEINLICHKEIT UND HÄUFIGKEIT*; (2009); ANDERS LINDBORG; https://vhkk.org/page/vortrag/pdf/Risikoabschaetzung_fuer_Ammoniak.pdf
123. *Ammoniak (R-717)*; (01.07.2021); UBA; <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/natuerliche-kaeltemittel-in-stationaeren-anlagen/kaeltemittel/ammoniak-r-717#>
124. *Rund 100 Personen evakuiert nach Ammoniak-Unfall in Pfäffikon ZH*; (03.09.2024); watson; <https://www.watson.ch/schweiz/polizeirapport/351642785-rund-100-personen-evakuiert-nach-ammoniak-unfall-in-pfaeffikon-zh>
125. *Kältemittel – Gesetzliche Grundlagen*; (Stand 04.2026); BAFU CH; <https://www.bafu.admin.ch/de/kaeltemittel>
126. *Wärme- und Kältekonzepte mit Großwärmepumpen*; (2022); Bundesverband Wärmepumpe (BWP); https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/waermepumpe/08_Sonstige/Filedump/BWP_A4_GrossWP_web_mail.pdf
127. *Einsatz von Groß-Wärmepumpen – Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln*; (Stand 04.2026); Kälte Klima Aktuell KKA; https://www.kka-online.info/artikel/kka_Grosswaermepumpen_mit_natuerlichen_Kaeltemitteln-1418633.html
128. *Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln*; (2016); UBA; https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/377/publikationen/2016-12-05_2015_abschlussbericht_wp-mit-nat-km_final.pdf
129. *Großwärmepumpe – Effiziente Großwärmepumpen für Industrie, Gewerbe und Fernwärme*; (Stand 04.2026); Kälte Schön; https://kaelte-schoen.de/grosswaermepumpe?qad_source=1&qad_campaignid=23613776783&qclid=EAlaIqobChMl-rWZvuiBIAMV64X9BR3O2SjXEAAAYiAAEqJb9fD_BwE

130. Nutzung von Oberflächengewässer für thermische Netze; (2017); BFE Schweiz; <https://www.google.com/url?sa=i&source=web&rct=j&url=https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/8797&ved=2ahUKEwjh3P3Fy4OUAxWvqv0HHYozGEAQqYcPegQICBAD&opi=89978449&cd&psiq=AOvVaw1qbU5ETO9esq0slZvz6fLM&ust=1777020549123000> ; (
131. Heizen und Kühlen mit Abwasser und Oberflächenwasser – Planungshilfe; (2025); Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL des Kanton Zürich; <https://www.zh.ch/de/planen-bauen/bauvorschriften/energienutzung-untergrund-wasser/energienutzung-abwasser-oberflaechenwasser.html>
132. Flusswasser sorgt für warme Stuben; (30.10.2024); Edison Media; <https://edison.media/energie/flusswasser-sorgt-fuer-warme-stuben/25251696/>
133. Innovatives Flusswärmeprojekt; (10.10.2024); Stadtwerke Wittenberge; <https://www.stadt-und-werk.de/k21-meldungen/innovatives-flusswaermeprojekt/>
134. Temperaturempfindlichkeiten der Fischgemeinschaften in deutschen Fließgewässern – Überprüfung der Orientierungswerte für die Temperatur; (2021); Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA);
135. Stellungnahme des Deutschen Angelfischerverband e.V. (DAFV) zum Refertenentwurf ... zur Förderung von Energie aus erneuerbaren Quellen ... und zu Zulassungsverfahren nach dem Wasserhaushaltsgesetz ... ; (2024); https://www.bundesumweltministerium.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/20_Lp/ee-richtlinie_wasserzulassung/Stellungnahmen/Verbaende/ee-richtlinie_wasserzulassung_stn_dafv_bf.pdf
136. Literaturstudie zu den Auswirkungen von Kühlwasserentnahme und -einleitung auf das aquatische Milieu des Elbeästuars; (2010); Koordinierungsraum Tideelbe; https://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2012/15619/pdf/10LitStudie_KoKW_TEL.pdf
137. Wasserrahmenrichtlinie für die ökologische Gewässerentwicklung nutzen; (2020); Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU); https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2020_Umweltgutachten_Kap_04_Wasserrahmenrichtlinie.html
138. Das Gewässerschutzgesetz der Schweiz; (2016); Christine Weber eawag; https://www.slf.ch/fileadmin/user_upload/WSL/Mitarbeitende/scheideg/20160926_GSchG_Christine.pdf
139. Praxistest und Verifizierungen des KLIWA-Index; (2018); KLIWA; https://www.kliwa.de/download/KLIWA_IndexMZB_Praxistest_BerichtAnlagen.zip
140. Anpassungsfähigkeit von Salmoniden an höhere Wassertemperaturen; (2025); Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Fischereiwirtschaft und Gewässerökologie Österreich; https://dafne.at/content/report_release/faa1e411-6ff5-4844-8753-71eb0d38232e_0.pdf
141. Flora und Fauna – Aquatische Wirbellose; (2018); KLIWA; <https://www.kliwa.de/gewaesseroekologie-florafauna-wirbellose.htm>
142. Wie wirkt der Klimawandel auf die Gewässerökologie?; (Stand 04.2024); LfU Bayern; https://www.lfu.bayern.de/wasser/klimawandel_wasserhaushalt/auswirkung_auf_wasserhaushalt/gewaesseroekologie/index.htm
143. Flüsse Betroffenheit; (Stand 04.2026); KLIWA; <https://www.kliwa.de/gewaesseroekologie-fluesse-betroffenheit.htm>
144. Dissolved Oxygen; (Stand 04.2026); Water Qualtry; <https://barberbunch.weebly.com/dissolved-oxygen-and-temperature.html>
145. THERMISCHE NUTZUNG VON OBERFLÄCHENGWÄSSERN; (2017); Gaudard et al. In AQUA & G AS No 5 | 2017; [https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/dload/eawag:14300/PDF/Gaudard-2017-Thermische_Nutzung_von_Oberfl%C3%A4chengew%C3%A4ssern._M%C3%B6gliche_\(published_version\).pdf](https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/dload/eawag:14300/PDF/Gaudard-2017-Thermische_Nutzung_von_Oberfl%C3%A4chengew%C3%A4ssern._M%C3%B6gliche_(published_version).pdf)
146. Fließgewässer; (27.05.2025); UBA; <https://www.umweltbundesamt.de/en/node/11221>
147. Flüsse unter Stress – die Oder; (04.07.2024); UBA; <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/fluesse/fluesse-unter-stress-die>
148. Length Scales, Rates, and Variability of Mixing Downstream of River Confluences; (2025); Meem, T. H., Rhoads, B. L., Lewis, Q. W., Umar, M., & Sukhodolov, A.; Geophysical Research Letters, 52, e2025GL114640; https://doi.org/10.1029/https://www.researchgate.net/publication/391051661_Length_Scales_Rates_and_Variability_of_Mixing_Downstream_of_River_Confluences

149. Großwärmepumpen mit R744 [CO₂]; (Stand 04.2026); Kälte Klima Aktuell; <https://www.kka-online.info/artikel/grosswaermepumpen-mit-r744-4108042.html>
150. Der Sauerstoffhaushalt der Tideeibe; (1996); MICHAEL BERGEMANN, GERD BLÖCKER, HEINZ HARMS, MARTIN KERNERREGINA MEYER-NEHLS, WILHELM PETERSEN, FRIEDHELM SCHROEDER; DIE KÜSTE; <https://www.fgg-elbe.de/files/Download-Archive/Fachberichte/Sauerstoffhaushalt/O2Haush.pdf>
151. Klimawandel und Fließgewässer in Schleswig-Holstein; (2009); Matthias Brunke; Landesportal Schleswig-Holstein; <https://umweltanwendungen.schleswig-holstein.de/Bestellsysteme/pdf/jahrbe07/Klimawandel%20und%20Flieessgwaesser.pdf>
152. Langzeit-Studie in Hessen: Drastischer Schwund an Wasserinsekten; (19.05.2020); Universität Kassel; <https://www.uni-kassel.de/uni/aktuelles-aus-der-universitaet/sitemap-detail-news/2020/05/19/langzeit-studie-in-hessen-drastischer-schwund-an-wasserinsekten.html?cHash=ef7a79cefccc7bdb3eea22ee88f8d37d>
153. Ableitung von Temperaturpräferenzen des Makrozoobenthos für die Entwicklung eines Verfahrens zur Indikation biozönotischer Wirkungen ; des Klimawandels in Fließgewässern; (2016); KLIWA Bericht Heft 20; <https://www.kliwa.de/download/KLIWAHeft20.pdf>
154. Limmat und Zürichsee zu warm: Forellen legen ihre Eier später; (10.12.2014); Limmattaler Zeitung – News; <https://www.limmattalerzeitung.ch/limmattal/region-limmattal/limmat-und-zurichsee-zu-warm-forellen-legen-ihre-eier-spaeter-ld.1661817>
155. Auswirkung der Kühlwassernutzung von Kraftwerken; (2016); Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 18/8801; <https://dserver.bundestag.de/btd/18/089/1808992.pdf>
156. Mixing dynamics at river confluences governed by intermodal behaviour, (2022); A. N. Sukhodolov , O. O. Shumilova, G. S. Constantinescu, Q. W. Lewis & B. L. Rhoads; Nature Geoscience | Volume 16 | January 2023 | 89–93; https://www.researchgate.net/publication/366319238_Mixing_dynamics_at_river_confluences_governed_by_intermodal_behaviour
157. Aktueller Kenntnisstand über mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf Fließgewässerökosysteme und die Biodiversität im Rheineinzugsgebiet; (2025); Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR); https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/DE/rp_De_0309.pdf
158. Rivers & Streams – Introduction – Dynamics – Dispersion; Benoit Cushman-Roisin, Thayer School of Engineering Dartmouth College; <https://cushman.host.dartmouth.edu/courses/engs43/Rivers.pdf>
159. Oberirdische Gewässer – Parameterblatt Sauerstoff; (2021); NLWKN; <https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/192331>
160. Sauerstoffgehalt und Wassertemperatur – Langjährige Entwicklung im Rheineinzugsgebiet; Bundesanstalt für Gewässerkunde BfG; https://undine.bafg.de/rhein/quetemessstellen/img/O2_WT_Gerloff_2024_10_07.pdf
161. Europe's state of water 2024; (2024); European Environment Agency; <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/europes-state-of-water-2024>
162. Wärmeenergetische Nutzung von Fließgewässern; (2017), Annika Pflum Bachelorarbeit am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Darmstadt; <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/entities/publication/68afcdf2-fb17-4f61-8441-aa3f2cb60f35>
163. Warum verkrautet die Aller so stark?; (3. Juli 2023); Celler Presse; <https://celler-presse.de/2023/07/03/warum-verkrautet-die-aller-so-stark/>
164. Wassertemperatur von Fließgewässern; (2023); UBA in WW-I-10: Indikatoren für die Deutsche Anpassungsstrategie – Indikator-Factsheets zum Handlungsfeld Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft; https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/5612/dokumente/ww-i-10_indikator_wassertemperatur_fluesse.pdf
165. ... wegen Verkrautung: Der Fluss stinkt im Sommer zum Himmel; (04.03.2026); az-online.de; <https://www.az-online.de/altmark/seehausen/wegen-verkrautung-der-fluss-stinkt-im-sommer-zum-himmel-94197138.html>
166. Study on mechanism of effect of flowing water and transferring heat on rock mass temperature in curved fracture; (2023); Junyi Gao, Changyu Lu & Yonggang Zhang; https://www.researchgate.net/publication/368665890_Study_on_mechanism_of_effect_of_flowng_water_and_tranferring_heat_on_rock_mass_temperature_in_curved_fracture
167. Riverbed Temperature and Heat Transport in a Hydropeaked River; (2021); Ferencz, Stephen & Muñoz, Sebastian & Neilson, Bethany & Cardenas, M.; Water Resources Research. 57. 10.1029/2021WR029609;

[https://www.researchgate.net/publication/350200087 Riverbed Temperature and Heat Transport in a Hydropeaked River/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/350200087_Riverbed_Temperature_and_Heat_Transport_in_a_Hydropeaked_River/citation/download)

168. Wasserhaushalts- und Wärmemodell für das hessische Rhein- und Maingebiet (Südhessen); (Stand 04.2026); Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie; <https://www.hlnug.de/themen/wasser/fliessgewaesser/wassertemperatur-vorhersage/suedhessen>
169. Stream temperature under contrasting riparian forest cover: Understanding thermal dynamics and heat exchange processes; (2017); Dugdale, Stephen & Malcolm, Iain & Kantola, Kaisa & Hannah, David, *The Science of the total environment*. 610-611. 1375-1389. 10.1016/j.scitotenv.2017.08.198; [https://www.researchgate.net/publication/319403100 Stream temperature under contrasting riparian forest over Understanding thermal dynamics and heat exchange processes](https://www.researchgate.net/publication/319403100_Stream_temperature_under_contrasting_riparian_forest_over_Understanding_thermal_dynamics_and_heat_exchange_processes)
170. River-Ice Hydrology in a Shrinking Cryosphere; (2009); Beltaos, Spyros & Prowse, Terry; *Hydrological Processes*. 23. 122 - 144. 10.1002/hyp.7165; [https://www.researchgate.net/publication/227777966 River-Ice Hydrology in a Shrinking Cryosphere](https://www.researchgate.net/publication/227777966_River-Ice_Hydrology_in_a_Shrinking_Cryosphere)
171. Temperatur des Grundwassers – Jahresbericht 2008; (2008); WOLF-PETER VON PAPE, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie; https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/das_hlnug/jahresberichte/2008/Jb_2008_059-068_screen.pdf
172. Hydrologische Messdaten Online; (Stand 04.2026); Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen (LANUK); <https://hochwasserportal.nrw/webpublic/#/overview/Wassertemperatur?filter=%7B%7D&period=P7D>
173. Dossier: Biogas in der Energiewende; (2025); Michael Huber S4F FG Kommunalen Klimaschutz; https://de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/3/2024/09/Biogas_in_der_Energiewende_DocHu_S4F_V2_21_03_2025.pdf
174. Kurzdossier: Waldzustand und Holznutzung national und international; (2024); Michael Huber S4F FG Kommunalen Klimaschutz; https://de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/3/2024/10/Kurzdossier-Waldzustand-und-Holznutzung-national-und-international_DocHu_V2_10_2024.pdf
175. Energieträger für das Heizen – Preisentwicklung, Klimawirkung, Verfügbarkeit; (2026); Clausen, Jens; Gerhards, Christoph; Huber, Michael; Jordan, Ulrike; Kemfert, Claudia; Klafka, Peter; Seifert Thomas; Spindler, Uli; Scientists for Future. Berlin; https://info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2026/03/Policy_Paper_10_Biobrennstoffe.pdf
176. Kraft-Wärme-Kopplung – Von der fossilen Effizienztechnologie zu einer neuen Rolle in der Wärmewende; (2023); Huber, Michael; Clausen, Jens; Ehrhardt, Helge; Gerhards, Christoph; Hoffmann, Rana; Klafka, Köhne, Anja; Peter; Linow, Sven; Seifert, Thomas; Policy Paper der Scientist for Future. Berlin; https://info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/02/Policy_Paper_06_KWK.pdf
177. Dezentrale Stromerzeugung, Speicher und intelligente Steuerung ersetzen nicht den Netzausbau über alle Ebenen; (2025); Huber M., Seifert T. S4F FG Kommunalen Klimaschutz; [https://de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/3/2025/08/Dezentralitaet Speicher u Intelligenz ersetzen nicht Stromnetzausbau V3 14 08 2025 final.pdf](https://de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/3/2025/08/Dezentralitaet_Speicher_u_Intelligenz_ersetzen_nicht_Stromnetzausbau_V3_14_08_2025_final.pdf)
178. Power-to-heat; (2016); BDEW; https://www.bdew.de/media/documents/Factsheet_PowerToHeat.pdf
179. Power-to-Heat – ein Baustein der Sektorkopplung für die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung und zur Systemintegration von Strom aus Erneuerbaren Energien; (2020); Positionspapier des BDEW; https://www.bdew.de/media/documents/Stn_20200427_Power-to-Heat.pdf
180. Heat Resources of Rivers in the Odra River Basin as a Potential Element Implement for Sustainable Development in Poland; (2025); Ptak, M.; Sojka, M.; Jat Baloch, M.Y.; Amnuaylojaroen; T.; *Resources* **2025**, 14, 184. <https://doi.org/10.3390/resources14120184>; <https://www.mdpi.com/2079-9276/14/12/184>
181. Wasser ist die Kohle der Zukunft – Oberflächenwasser als Wärmequelle; (2025); Bernd Felgentreff in *Wasserkraft & Energie* 2/2025;
182. Evaluation und systematische Erfassung von Wärmepumpen-Systemen in Fließgewässern; (2018); Lukas Abel, Bachelorarbeit an der Universität Gießen; <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/server/api/core/bitstreams/ca1fe69c-1a9d-4570-b646-53613abb91bf/content>
183. Wärmenutzung aus Seen und Fließgewässern; (2022), Facsheet der eawag; https://www.eawaq.ch/fileadmin/Domain1/Beratung/Beratung_Wissenstransfer/Publ_Praxis/Faktenblaetter/fb_waermenutzung_2022.pdf

184. Weissbuch Fernwärme Schweiz – VFS Strategie; (2017); Dr. Eicher+Pauli AG im Auftrag Verband Fernwärme Schweiz (VFS); https://www.thermische-netze.ch/fileadmin/user_upload/Dokumente/Publikationen/Downloads/Fernwaerme_Weissbuch-deutsch.pdf
185. Fernwärme in der Stadt Zürich; (Stand 04.2026); ewz Elektrizitätswerk der Stadt Zürich; <https://www.ewz.ch/de/geschaeftskunden/immobilien/referenzen-projekte/fernwaerme.html>
186. Das Erdgasnetz, das Heizen mit Wasserstoff und die Wärmepumpe. (2024); Clausen, J., Huber, M., Kemfert, C., & Klafka, P.; Berlin: Borderstep Institut; <https://www.borderstep.de/publikation/clausen-j-huber-m-kemfert-c-klafka-p-2024-das-erdgasnetz-das-heizen-mit-wasserstoff-und-die-waermepumpe-berlin-borderstep-institut/>
187. Wald erhalten oder den Wald ernten solange es ihn noch gibt?; (2025); Dr. Michael Huber, Bündnis Ausgebrannt; https://ausgebrannt.org/wp-content/uploads/2025/11/Wald-erhalten-oder-den-Wald-ernten-solange-es-ihn-noch-gibt_V5_10_2025_DocHu.pdf
188. Marktanalyse von Aquathermiesystemen zur thermischen Nutzung von Gewässern; (2026); Tilia m Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie; <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/49775/documents/76770>