

THERMISCHE NUTZUNG VON SEEN UND FLÜSSEN

POTENZIAL DER SCHWEIZER OBERFLÄCHENGEWÄSSER

Die Schweizer Oberflächengewässer enthalten sehr grosse Mengen erneuerbarer thermischer Energie, wovon ein Teil zum Heizen und Kühlen nahe gelegener Infrastrukturen genutzt werden kann. Dieser Artikel präsentiert eine Abschätzung des thermischen Potenzials der wichtigsten Schweizer Seen und Flüsse, vergleicht dieses Potenzial mit der regionalen Nachfrage und fasst die mit der Nutzung dieser thermischen Energie verbundenen Überlegungen und technischen Schwierigkeiten zusammen.

Adrien Gaudard*; Martin Schmid; Alfred Wüest, Eawag

RÉSUMÉ

UTILISATION THERMIQUE DES EAUX SUPERFICIELLES: POTENTIEL

Les lacs et rivières peuvent être utilisés comme source de chaleur renouvelable pour le chauffage et le refroidissement de bâtiments, d'infrastructures et de procédés industriels. Une telle utilisation thermique des eaux superficielles permet d'importantes économies de combustibles fossiles et d'électricité et va dans le sens du tournant énergétique. Elle favoriserait également un approvisionnement local avec des retombées positives pour l'économie, étant donné qu'en Suisse, la plupart des agglomérations sont situées en bordure des lacs et des rivières. En tenant compte des impacts possibles, des limites sont fixées et le potentiel des principales eaux superficielles est estimé. Pour la plupart des cas considérés, ce potentiel surpasse largement la demande régionale maximale, laissant entrevoir la possibilité d'une utilisation à plus grande échelle, représentant jusqu'à 40% de la demande suisse en chaleur et en froid. Des facteurs externes entravent l'utilisation thermique des corps d'eau, notamment (pour le chauffage) une faible rentabilité face aux combustibles fossiles. Un système requiert une longue étape de pré-étude et de planification, d'importants investissements, et peut être sujet à des problèmes opérationnels (p. ex. dus à la température ou composition de l'eau utilisée). L'utilisation thermique des lacs et rivières est particulièrement adaptée aux systèmes de grande taille avec une vision à long terme.

EINLEITUNG

Der jährliche Nettoenergieverbrauch in der Schweiz beträgt rund 850 PJ [1]. Knapp die Hälfte davon, d. h. 400 PJ, wird zum Heizen von Gebäuden, zur Warmwasseraufbereitung und für industrielle Prozesse verwendet [2]. Zu schätzungsweise 80% wird diese Wärmeenergie aus der Verbrennung der fossilen Energieträger Erdgas und Heizöl gewonnen [3]. Dies obschon zahlreiche alternative Wärmequellen zur Verfügung stehen, wie *Tabelle 1* zeigt [4].

Um die CO₂-Emissionen zu vermindern, ist der schrittweise Ersatz der fossilen Brennstoffe durch andere Energieträger unerlässlich. Die Rückgewinnung von Abwärme und die Nutzung der Umgebungswärme sind umweltfreundliche, zukunftsgerichtete Lösungen, die eine lokale und nachhaltige Energieproduktion ermöglichen. Um Niedertemperatur-Wärmequellen nutzen zu können, kommen Wärmepumpen zum Einsatz, welche die Temperatur auf das vom Nutzer gewünschte Niveau anheben. Die Wärmepumpen benötigen externe Energie (meist Elektrizität), die typischerweise 20 bis 35% der erzeugten Wärme ausmacht. Der Kühlbedarf in der Schweiz beträgt aktuell rund 70 PJ (ohne Berücksichtigung der Kühlung der Kernkraftwerke) und wird mehrheitlich durch elektrische Klimaanlagen abgedeckt [5]. Auch für diese Kühlzwecke kann die Umwelt als Kältequelle

* Kontakt: adrien.gaudard@eawag.ch

Typ	Wärmequelle	Typische Temperatur
Anthropogene Abwärme	Thermische Kraftwerke/Atomkraftwerke	> 80 °C
	Kehrichtverbrennungsanlagen	> 80 °C
	Industrielle Prozesse	Variabel
	Abwasser [6, 7]	5-20 °C
Erneuerbare Umweltwärme	Seen und Flüsse	4-20 °C
	Grundwasser	6-15 °C
	Erde (Geothermie)	0-100 °C
	Luft	0-30 °C

Tab. 1 Wärmequellen zum Ersatz fossiler Brennstoffe für Heizzwecke.
Sources de chaleur pouvant remplacer les carburants fossiles pour le chauffage.

genutzt werden. Seen, Alpenflüsse, Grundwasservorkommen und Böden sind im Sommer meist deutlich kühler als die Luft. Oft können diese Kältequellen ohne Klimaanlagen direkt für die Kühlung verwendet werden, wodurch eine beträchtliche Menge Elektrizität gespart wird.

Dieser Artikel konzentriert sich auf die thermische Nutzung von Seen und Flüssen. Diese enthalten lokal grosse Wassermengen und stellen wegen der hohen thermischen Kapazität des Wassers einen sehr effektiven Wärmespeicher dar. Zudem ist die Temperatur der oberirdischen Gewässer deutlich konstanter als die stark variierende Lufttemperatur.

THERMISCHE NUTZUNG VON SEEN UND FLÜSSEN

Für die Entnahme von Wärme oder Kälte aus einem See oder einem Fluss braucht es eine Wasserfassung, einen Primärkreislauf, in dem das See-/Flusswasser zirkuliert, und meist einen

Sekundärkreislauf, der die Wärmeträgerflüssigkeit¹ zum Nutzer bringt. Für die Heizung werden Wärmepumpen verwendet, und die Heizflüssigkeit zirkuliert normalerweise in einem zentralen (ein einziger Kreislauf für alle Nutzer) oder dezentralen (ein Kreislauf für jeden Nutzer) Tertiärkreislauf. Wärmetauscher ermöglichen die Wärmeübertragung zwischen den verschiedenen Kreisläufen. Figur 1 zeigt ein solches System. Obwohl das Know-how in der Schweiz vorhanden ist, stehen bisher erst wenige grössere Anlagen (> 2 MW) in Betrieb.

Die thermische Nutzung ist mit der Rückgabe von erwärmtem (bei Kühlung) bzw. abgekühltem (bei Heizung) Wasser verbunden. Diese thermische Rückgabe erfolgt oft in dasselbe Gewässer, aus dem das Wasser zuvor entnommen worden ist. Die Temperatur beeinflusst physikalische, chemische und biologische Prozesse im Gewässer; daher kann sich eine thermische Rückgabe auf die Lebensbedingungen von Organismen auswirken. Die möglichen Folgen für das aquatische Ökosystem wurden in einem früheren Artikel zusammengefasst [9]. Besonders heikel sind Erwärmungen der Gewässer, die den bereits durch den Klimawandel verursachten Stress auf die Ökosysteme weiter verstärken können. Wichtig ist auch, dass die ökologischen Funktionen von Gewässern nicht beeinträchtigt werden. Beispielsweise sollten in Flüssen die Migration von Fischen oder in Seen die saisonale Tiefenmischung gewährleistet bleiben [9]. In der Schweiz liegen die meisten grösseren Agglomerationen nahe an grossen Seen und Flüssen. Eine thermische Nutzung der oberirdischen Gewässer kann daher in vielen Fällen in Betracht gezogen werden. In diesem Artikel wird das thermische Potenzial der wichtigsten Seen und Flüsse in der Schweiz abgeschätzt und mit dem regionalen maximalen Heiz- und Kühlbedarf verglichen. Diese Abschätzungen erfolgen aufgrund vereinfachter Berechnungen und geben eine Größenordnung

¹ üblicherweise Wasser; komprimiertes CO₂ ist eine mögliche Alternative [8]

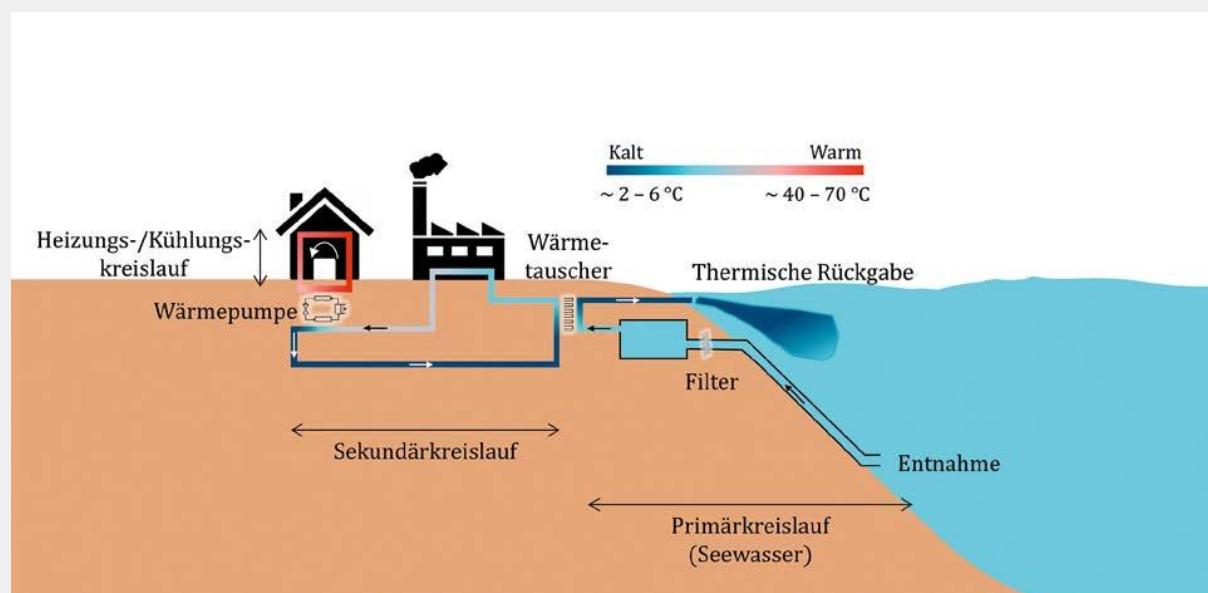


Fig. 1 Beispiel einer Anlage für die thermische Nutzung aus einem See. In diesem Beispiel wird Seewasser genutzt, um dezentral eine Industrieanlage zu kühlen und anschliessend ein Haus zu heizen. Hier ist Heizung dominant und daher ist das Rückabgewasser kälter als das gefasste Seewasser.

Exemple d'un système d'utilisation thermique d'un lac. Dans cet exemple, l'eau du lac est utilisée pour refroidir une industrie et ensuite pour chauffer une maison de manière décentralisée. Ici, le chauffage est dominant ; l'eau rejetée est donc plus froide que l'eau captée.

an. Für die Umsetzung einer konkreten thermischen Nutzung, die sich der hier abgeschätzten Größenordnung annähert, müsste eine vertiefte Analyse durchgeführt werden, welche die spezifischen Eigenschaften des betroffenen Gewässers berücksichtigt.

NACHFRAGE

Für jeden berücksichtigten See und Fluss wurde die regional maximale Nachfrage (inkl. Haushalte, Industrie und Gewerbe) abgeschätzt. Diese Schätzung stützt sich auf die Anzahl Einwohner in den an das Gewässer angrenzenden Gemeinden. Ausgehend von der gesamten Nachfrage für Heizung und Kühlung der Schweiz (vgl. *Einleitung*), d. h. für 8 Millionen Menschen, kann so auf die regionale Nachfrage geschlossen werden.

Mit dieser Methode wird die reale Nachfrage meist deutlich überschätzt. In Realität befinden sich viele der in der Abschätzung mitgezählten Einwohner zu weit weg vom Gewässer, als dass ein Anschluss an einen Wärme- oder Kühlverbund realistisch wäre. Vor allem dicht bebauten und direkt am Gewässer liegende Ortsteile können von einer thermischen Nutzung des Gewässers profitieren. Die gesamte maximale Nachfrage rund um die Seen wird auf 135 PJ Wärme und 25 PJ Kälte geschätzt, entlang der Flüsse auf 205 PJ Wärme und 37 PJ Kälte. Dabei wurden einige Gemeinden sowohl einem Fluss als auch einem See zugewiesen, die gesamte maximale Nachfrage ist deshalb kleiner als die Summe dieser Werte.

POTENZIAL

Die zur Abschätzung des Potenzials der Seen und Flüsse verwendete Methode wird im Folgenden beschrieben. Das Potenzi-

al wurde wenn möglich für jeden Monat berechnet, und sonst quartalsweise für Dezember bis Februar (Winter), März bis Mai (Frühling), Juni bis August (Sommer) und September bis November (Herbst). Hier werden die auf ein Jahr kumulierten Potenziale präsentiert.

Das gewässerseitige Potenzial E entspricht der aus dem jeweiligen See oder Fluss extrahierbaren thermischen Energie. Im Falle der Kühlung wird von einer direkten Kühlung (*free cooling*) ausgegangen. Im Fall der Wärmenutzung stammt ein zusätzlicher Teil der Wärme von der elektrischen Energie E_{WP} der Wärmepumpen:

$$E_{WP} = \frac{1}{COP - 1} E$$

Die Leistungszahl $COP [-]$ einer Wärmepumpe wird nach folgender Formel ermittelt [10]:

$$COP \cong 0,5 \frac{T_o + 273,15}{T_o - T_s}$$

$T_o [^{\circ}\text{C}]$: Austrittstemperatur der Wärmepumpe (Annahme: 50 °C)

$T_s [^{\circ}\text{C}]$: Temperatur der Wärmequelle (See- oder Flusswasser), unter Annahme eines Verlusts von 1 °C an den Wärmetauschern

Das Gesamtpotenzial ergibt sich aus der Summe von E und E_{WP} .

SEEN

Für die thermische Nutzung eines Sees wird angenommen, dass die Temperatur eines bestimmten Wasservolumens $V_{\text{Rückgabe}} [\text{m}^3]$ sich um einen bestimmten Wert $\Delta T [^{\circ}\text{C}]$ in einem vorgegebe-

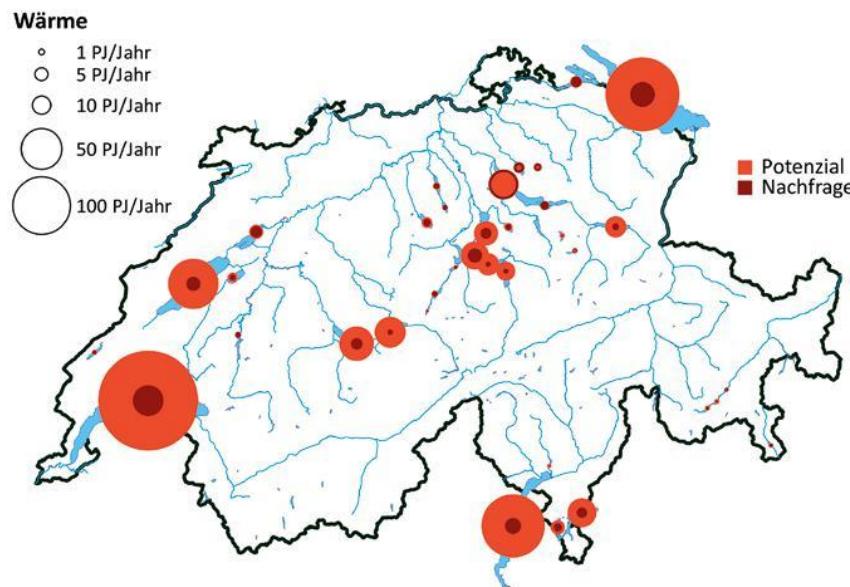


Fig. 2 Potenzial der Schweizer Seen für Wärmeextraktion und regional maximale Nachfrage. Die Fläche der Kreise ist proportional zum entsprechenden Wert.

Potentiel des lacs suisses pour l'extraction de chaleur, et demande régionale maximale. La surface des cercles est proportionnelle à la valeur correspondante.

nen Zeitraum verändert. Das Potenzial (in [J]) ergibt sich aus folgender Formel, mit $c_{\text{Wasser}} \cong 4,2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3/\text{°C}$ für die spezifische Wärmekapazität von Wasser:

$$E_{\text{See}} = c_{\text{Wasser}} V_{\text{Rückgabe}} \Delta T$$

Das zur Verfügung stehende Wasservolumen $V_{\text{Rückgabe}}$ wird so bestimmt, dass die Auswirkungen auf den See beschränkt sind, insbesondere, dass die sommerliche Schichtung des Sees möglichst nicht verstärkt oder verlängert wird [9], um die winterliche Durchmischung nicht zu stören. Für Seen, die im Winter nicht regelmässig durchmischen (oligomiktische Seen) oder für jene, deren Durchmischung des Tiefenwassers essenziell ist, wird $V_{\text{Rückgabe}}$ so definiert, dass aufgrund der Nutzung keine Erwärmung der oberflächennahen Schichten und keine Abkühlung der tieferen Schichten im Herbst erfolgt. Zusätzlich wird eine Erwärmung der oberflächennahen Schichten oder der Sprungschicht für alle Seen im Frühling und Sommer vermieden.

Die maximal tolerierbare Veränderung der Wassertemperatur im Jahresverlauf wird für die Potenzialschätzung wie folgt definiert: $\Delta T = -1,0 \text{ °C}$ für die Wärmeentnahme, $\Delta T = +0,5 \text{ °C}$ für die Kälteentnahme. Diese Temperaturveränderungen sollten in der Regel im See keine Temperaturen verursachen, die natürlich nicht vorkommen würden.

Insgesamt wurden 36 Seen oder Seebecken betrachtet, welche die wichtigsten Schweizer Seen mit genügender Grösse und Tiefe umfassen (Fig. 2 und Fig. 3), jedoch ohne alpine Speicherseen. Die verwendeten Temperaturdaten stammen von den jeweiligen kantonalen Fachstellen.

FLÜSSE

Für die thermische Nutzung der Flüsse wird angenommen, dass sich die Temperatur bei einer bestimmten Abflussmenge $Q [\text{m}^3/\text{s}]$ um einen Wert $\Delta T [\text{°C}]$ verändert. Das monatliche Potenzial (in [J]) ergibt sich somit aus folgender Formel, mit $t_{\text{Monat}} [\text{s}]$ für die Dauer des betrachteten Monats:

$$E_{\text{Fluss}} = c_{\text{Wasser}} Q \Delta T t_{\text{Monat}}$$

Die grossen Flüsse wurden in mehrere Abschnitte aufgeteilt und das Potenzial an verschiedenen Stellen entlang des Flusslaufs abgeschätzt. Die verfügbare Abflussmenge Q entspricht dem monatlich mittleren Abfluss an der betrachteten Stelle. Liegen andere Beurteilungsstellen im Oberstrom (ggf. auch an einem Zufluss), wird der dortige Abfluss abgezogen, um eine mehrfache Belastung desselben Wassers zu vermeiden.

Die maximal tolerierbare Temperaturveränderung wird gemäss der Anforderung der Gewässerschutzverordnung für Gewässer der Forellenregion auf $\Delta T = -1,5 \text{ °C}$ bei Wärmenutzung und $\Delta T = +1,5 \text{ °C}$ bei Kältenutzung festgelegt. Da Erwärmungen generell heikler sind als Abkühlungen und die ökologischen Auswirkungen unter anderem von den vorhandenen Arten und von der Jahreszeit abhängig sind, sind diese Grenzwerte nicht immer vernünftig. Deshalb verlangt die Gewässerschutzverordnung zusätzlich, dass «die Temperaturverhältnisse des Gewässers nicht derart verändert werden, dass dessen Selbsteinigungsvermögen vermindert wird oder die Wasserqualität für das Gedeihen der für das Gewässer typischen Lebensgemeinschaften nicht mehr genügt». Die thermische Nutzung eines Flusses kann durch diese Forderung weiter eingeschränkt werden, was bei der Po-

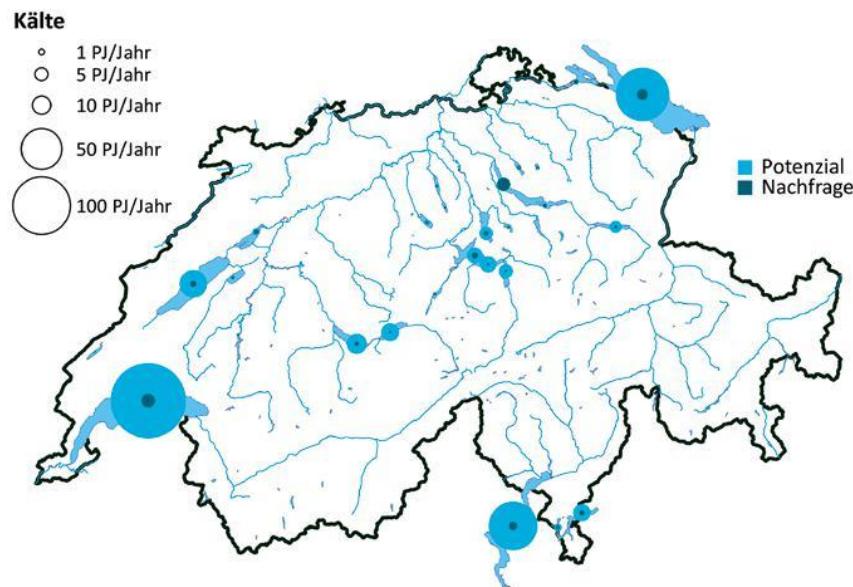


Fig. 3 Potenzial der Schweizer Seen für Kälteextraktion und regional maximale Nachfrage. Die Fläche der Kreise ist proportional zum entsprechenden Wert.

Potentiel des lacs suisses pour l'extraction de froid, et demande régionale maximale. La surface des cercles est proportionnelle à la valeur correspondante. correspondante.

tenzialabschätzung hier nicht berücksichtigt werden konnte. Insgesamt wurden 35 Flüsse an 57 Standorten berücksichtigt, welche die Mehrheit des Potenzials im Schweizer Fliessgewässernetz repräsentieren (Fig. 4 und 5). Sämtliche verwendeten Daten für Abflüsse und Temperaturen stammen vom Bundesamt für Umwelt.

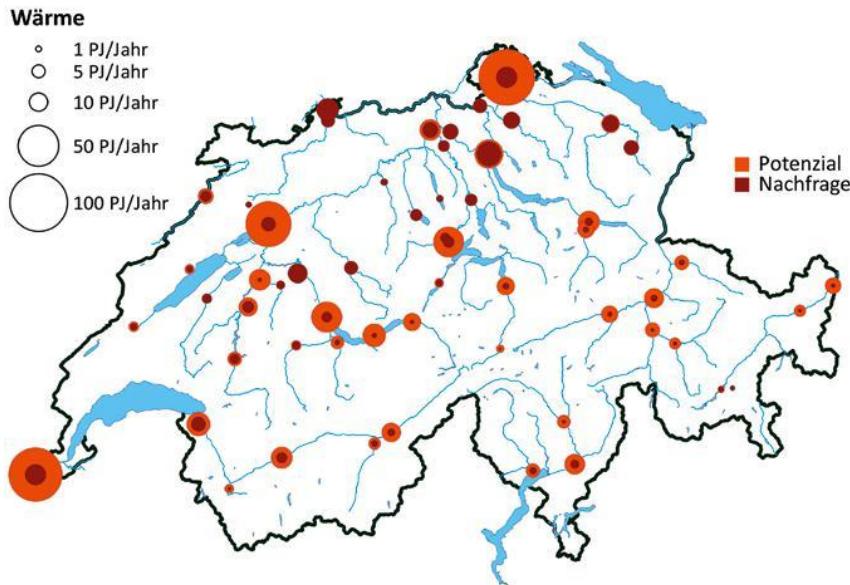


Fig. 4 Potenzial der Schweizer Flüsse für Wärmeextraktion und regional maximale Nachfrage. Die Fläche der Kreise ist proportional zum entsprechenden Wert.

Potentiel des rivières suisses pour l'extraction de chaleur, et demande régionale maximale. La surface des cercles est proportionnelle à la valeur correspondante.

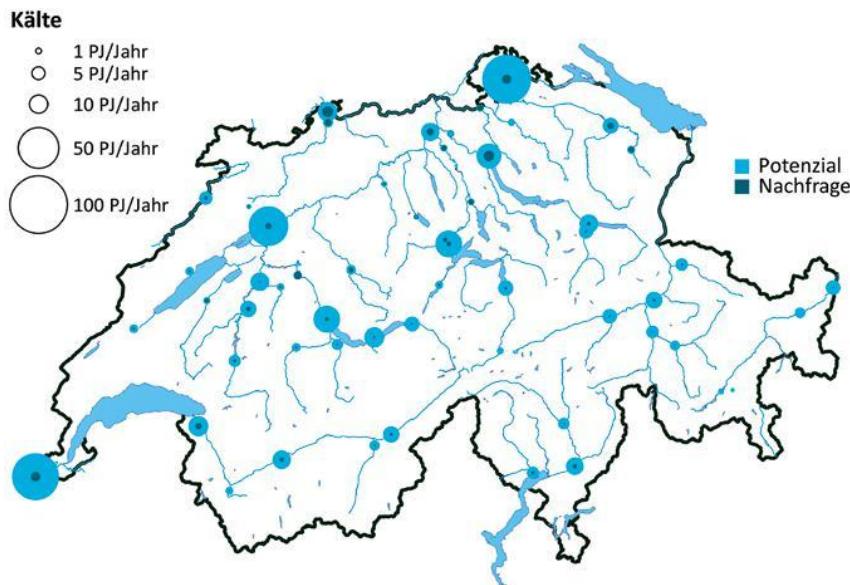


Fig. 5 Potenzial der Schweizer Flüsse für Kälteextraktion, und regional maximale Nachfrage. Die Fläche der Kreise ist proportional zum entsprechenden Wert.

Potentiel des rivières suisses pour l'extraction de froid, et demande régionale maximale. La surface des cercles est proportionnelle à la valeur correspondante.

ALLGEMEINE ANMERKUNGEN

Die Abschätzung des Potenzials der oberirdischen Gewässer unterstreicht deren enorme Wärmereserven. Die berechneten Potenziale sind meist höher als die regional maximale Nachfrage – mit Ausnahme sehr dicht besiedelter Gebiete wie der Region Zürich. Das Wärmepotenzial ist für den Greifensee, den Pfäffikersee und den St. Moritzersee deutlich geringer als die Nachfrage, ebenso bei den Mittellandflüssen in den grossen Städten. Unter der Annahme, dass die Hälfte der geschätzten Nachfrage dem jeweiligen See oder Fluss entnommen werden kann (falls das entsprechende Potenzial dazu vorhanden ist), erhält man eine totale Wärmemenge von 160 PJ und eine Kältemenge von 30 PJ. Dies entspricht rund 40% des Bedarfs der Schweiz.

Die Auswirkungen einer thermischen Nutzung (Wärme und Kälte) im Umfang der Hälfte der geschätzten Nachfrage wurden für den Bodensee und den Zürichsee modelliert. Im Bodensee sind die simulierten Temperaturveränderungen² kaum messbar (< 0,05 °C), im Zürichsee erreichen sie 0,5 °C. Tendenziell werden die Seen abgekühlt, da der Heizbedarf den Kühlbedarf deutlich übersteigt.

Die Nachfrage schwankt im Laufe des Jahres stark, was mit den Jahreswerten nicht berücksichtigt werden kann. Der Heizbedarf ist im Sommer gering, während sich der Kühlbedarf weitgehend auf den Sommer beschränkt. Bei Kühlungen kann die Situation im Sommer daher problematisch sein, auch wenn das ermittelte jährliche Kühlpotenzial die Nachfrage übersteigt.

In der Praxis sind bei weitem nicht alle Gewässer gleichermaßen für eine thermische Nutzung geeignet. Flüsse mit glazialem oder nivalem Regime (d.h. vor allem durch Gletscher- und Schneeschmelze gespiesen) sind im Winter oft zu kalt für eine effiziente Wärmeentnahme. Andererseits kann die Temperatur in Mittellandflüssen unterhalb eines Sees zeitweilig für eine sinnvolle Kälteentnahme zu hoch sein, bzw. ein Wärmeeintrag könnte nicht bewilligt werden. In den Seen ist die Temperatur der Oberflächenschicht zwar höher als die Temperatur der tiefen Schichten, gleichzeitig aber auch viel variabler. Man kann daher im Bezug auf die Effizienz optimale Standorte für eine thermische Nutzung definieren

	Seen	Flüsse
Wärmeextraktion (Oktober–März)	um 15–40 m Tiefe (Temp.: 4–10 °C)	im Unterstrom eines tiefgelegenen Sees (Temp.: 4–12 °C)
Kälteextraktion (Juni–August)	um 30–70 m Tiefe (Temp.: 4–8 °C)	mit alpinem Einzugsgebiet (Temp.: 2–15 °C)

Tab. 2 Optimale Lage für die Wasserfassung je nach Gewässer und thermischer Nutzung sowie typischer Temperaturbereich

Emplacement optimal pour la prise d'eau selon le corps d'eau et l'utilisation thermique, et plage de température typique.

(Tab. 2). Bei Flüssen mit geringem Niedrigwasserabfluss sowie bei wenig tiefen Seen sind alternative Wärme- oder Kältequellen in Betracht zu ziehen.

Für direkt an einem See und in der Nähe seines Ausflusses gelegene Kältenutzungen existiert eine zusätzliche Möglichkeit: Kaltes Tiefenwasser aus dem See kann genutzt und erwärmt direkt in den Ausfluss eingeleitet werden. Wenn dabei sichergestellt wird, dass die Rückgabeterminatur nicht höher als die Flusstemperatur ist, resultiert im Sommer keine unerwünschte Erwärmung. Das Potenzial dieser Methode ist jedoch aufgrund der Absenkung der Seeoberflächenschichten limitiert, da es zu einer Erwärmung der Sprungschicht führt, die sich negativ auf den See auswirken kann (z.B. zeitliche Verschiebung der winterlichen Durchmischung) [9].

Die Klimaveränderung wird nicht nur die Nachfrage nach Wärme und Kälte beeinflussen, sondern auch das thermische Potenzial der Seen und Flüsse. Es ist zu erwarten, dass sich der Heizbedarf bis zum Jahr 2050 um mindestens einen Viertel vermindern wird (auch dank einer besseren Gebäudeisolierung), während sich der Kühlbedarf beinahe verdoppeln könnte (immer mehr Nutzer werden Kühlungen installieren wollen) [11, 12]. Das Potenzial wird sich entgegengesetzt entwickeln, jedoch in deutlich geringerem Masse.

HERAUSFORDERUNGEN UND WIRTSCHAFTLICHKEIT

Das grosse Wärme- und Kältepottenzial der Seen und Flüsse wird heute aus verschiedenen Gründen noch wenig genutzt: fehlende Wahrnehmung der Möglichkeiten, mangelnde Erfahrung, inhärente Hindernisse der jeweiligen Gewässer (Tab. 3), Schwierigkeiten bei der Umsetzung und beim Betrieb sowie teilweise eine zu tiefe Rentabilität.

Im Betrieb wird in den Leitungen des Primärkreislaufs (See- oder Flusswasser) manchmal ein Wachstum aquatischer

Lebewesen (z.B. Biofilm und Muscheln) beobachtet. Dieses Problem kann insbesondere in den Wärmetauschern kritisch sein, in denen ein Biofilm den Fließwiderstand erhöht und die Effizienz des Wärmetauschers vermindert [13]. Verschiedene Faktoren erhöhen das Risiko eines derartigen Bewuchses:

- untiefe Wasserentnahme
- nährstoffreiches Wasser
- Erwärmung des gepumpten Wassers
- Zonen mit geringer Strömung im Primärkreislauf oder in den Wärmetauschern
- Oberflächen von ungenügender Qualität oder aus ungeeignetem Material [14]

Plattenwärmetauscher werden häufiger besiedelt als Rohrwärmetauscher, insbesondere wenn die Platten einen geringen Abstand und somit eine grössere Kontaktfläche aufweisen. Es konnte gezeigt werden, dass eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit (auch vorübergehend) gegen die Bildung von Biofilmen wirksam ist [14]. Trotzdem ist oft eine punktuelle mechanische Reinigung erforderlich. Zebrazmuscheln wiederum, deren Larven die Filter passieren können, kommen in der Regel unterhalb von 20 m Tiefe (Tessin: 30 m) nicht vor. In Zukunft muss aber in verschiedenen Gewässern auch mit dem Auftreten der Quagga-Muschel gerechnet werden, die grössere Tiefen besiedeln kann [15].

Bei der Planung der thermischen Nutzung eines Gewässers müssen bestehende oder künftige Nutzungen in der Nähe berücksichtigt werden [16], wie beispielsweise Fischerei, Trinkwasserfassungen oder im Boden verlegte Kabel.

Die Wirtschaftlichkeit der thermischen Nutzung eines Gewässers ist das Haupthindernis für eine breitere Nutzung dieser Technik. Die Errichtung einer neuen Anlage erfordert hohe Investitionen (Vorstudien und Planung, Errichten der Wasserfassung, Aufbau eines Wärmeverbundes usw.) und verursacht variable Betriebskosten (Energie für die

² des mittleren jährlichen Temperaturprofils

Gegebenheit	Massnahme(n)	Beispiel(e)
See, bei dem die vertikale Durchmischung leicht gestört werden könnte	Erwärmung der Oberflächenschichten oder Abkühlung der Tiefenschichten verhindern, besonders im Herbst und Winter [17]	Genfersee
Nährstoffreicher See	Rückgabe von nährstoffreichem Wasser (z.B. aus den Tiefenschichten) in die Oberflächenschichten vermeiden [18]	Baldeggsee, Lugarersee, Zugersee
Vom restlichen See isoliertes Becken	Separate Betrachtung des Beckens (insbesondere bezüglich der Wärmeakkumulation) [19]	Lüscherzerbecken (Bielersee), Becken im Vierwaldstättersee
See (oder Seebereich), der starkem Wind-einfluss ausgesetzt ist	Analyse der Auswirkungen des Windes auf die Temperatur bei der Wasserfassung [20, 21]	Genfersee
Steile Abhänge im See (Risiko unterseeischer Rutschungen)	Wasserfassung außerhalb der Risikozonen [22]	Bielersee, Lugarersee, Vierwaldstättersee
Für eine Bohrung zu wenig stabile Uferböschungen (z.B. Schotter)	Geologische Aufnahmen und Anpassung der Technik für die Erstellung der Wasserfassung	Vierwaldstättersee
Rückgabe in einen Fluss direkt vor dessen Mündung in einen See	Analyse der Auswirkungen auf die Zufuhr von Wärme, Nährstoffen, Sauerstoff und Sedimenten in den See [23, 24]	Interlaken (Thunersee), Mühlberg (Bielersee)

Tab. 3 Typische Gegebenheiten, die Schwierigkeiten für die thermische Nutzung eines Sees oder Flusses verursachen können.

Situations types pouvant causer des difficultés pour l'utilisation thermique d'un lac ou d'une rivière.

Wärmepumpen, Kosten für Revisionen und Reinigung, Wassernutzungsgebühren usw.). Bei den aktuellen Preisen für fossile Brennstoffe ist eine Amortisation bei Wärmenutzungen auch im besten Fall erst nach einem Jahrzehnt möglich. Die Deckung des Spitzenbedarfs durch einen Brennstoff verbessert die Rentabilität, das System ist dann so ausgelegt, dass typischerweise 80 bis 95% des Wärmebedarfs mit erneuerbarer Energie gedeckt wird³. Bei Kühlnutzung hingegen sind die Betriebskosten meist deutlich geringer als bei anderen Lösungen (z. B. elektrisch betriebene Klimaanlagen), so dass die Amortisation schneller möglich ist. Die Amortisationsdauer ist für Unternehmen der öffentlichen Hand eher tragbar als für private Unternehmen. Darüber hinaus kann bei einem grossen Verbund das Verhältnis zwischen Leistung und Kosten potenziell besser optimiert werden als bei einem kleinen System. Die thermische Nutzung der Seen und Flüsse bietet sich daher besonders für grosse Projekte an, die von der öffentlichen Hand mitgetragen werden.

Bei Fernwärme kann die Machbarkeit anhand der Energiedichte der Nachfrage beurteilt werden. Jährliche Mindestwerte von 2 MWh pro Laufmeter Leitung oder von 300 MWh pro Hektare werden oft als Referenzgrössen verwendet [25].

Schliesslich können externe Beiträge die Wirtschaftlichkeit eines Systems verbessern. So bietet z. B. die Stiftung KliK solche Beiträge im Rahmen der Anreizprogramme «Wärmeverbünde» und «Kli-

mafreundliche Kälte» an [26]. Manchmal stehen auch kantonale oder regionale Förderbeiträge zur Verfügung.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Hinsichtlich der energiepolitischen Ziele – nachhaltige Energieversorgung, Verminderung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen – ist die Nutzung der Gewässer als Wärme- und Kältequellen sehr attraktiv. Das Potenzial der Schweizer Seen und Flüsse ist beträchtlich und meist deutlich grösser als die Nachfrage – mit Ausnahme gewisser sehr dicht besiedelter Gebiete. In der Praxis können vor allem kleinere Flüsse nicht das ganze Jahr effektiv genutzt werden, da ihre Temperatur entweder im Winter zu tief oder im Sommer zu hoch ist. Mit einer durchdachten Konzeption der Systeme zur thermischen Nutzung und einer Koordination zwischen den verschiedenen Akteuren können die möglichen Auswirkungen auf die Ökosysteme vermieden oder in genügendem Masse minimiert werden [9].

Die Nutzung des vorhandenen Potenzials wird vor allem durch wirtschaftliche und gesetzliche Anforderungen beschränkt. Zudem sind von der Nutzung eines Gewässers verschiedene, sich zum Teil widersprechende Interessen betroffen (Produktion erneuerbarer Energie, Gewässerschutz, Bau von Infrastrukturen usw.), die von verschiedenen Instanzen vertreten werden (Kantone, Gemeinden, Energielieferanten und Konsumenten, Umweltverbände, Privatunternehmen usw.). Dadurch werden Projekte komplex, die Kosten werden erhöht und die Planungs- und Umsetzungsphasen werden

verlängert. Auf lange Sicht und bei guter Planung kann die thermische Nutzung eines Gewässers sowohl ökonomisch wie auch ökologisch nachhaltig gestaltet werden.

WEITERE INFORMATIONEN

<https://thermdis.eawag.ch/de>

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BFE (2017): *Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2016 – Statistique globale suisse de l'énergie 2016*. Bundesamt für Energie, 805.006.16
- [2] Prognos AG et al. (2015): *Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2014 nach Verwendungszwecken*. Bundesamt für Energie (BFE)
- [3] Eicher, H. et al. (2014): *Erneuerbare Energien – Umweltfreundliche Versorgung*. EnergieSchweiz
- [4] Eicher & Pauli (2014): *Weissbuch Fernwärme Schweiz – VFS Strategie, Langfristperspektiven für erneuerbare und energieeffiziente Nah- und Fernwärme in der Schweiz*. Verband Fernwärme Schweiz (VFS), Schlussbericht Phase 2: GIS-Analyse und Potentialstudie 12.3156.1
- [5] Dumortier, R. et al. (2012): *Elektrizitätsbedarf für Kühlung in der Schweiz*. EnergieSchweiz, Zürich
- [6] Müller, E. A.; Dietler, M. (2015): *Abwasser als Energiequelle: Abwasser zum Heizen und Kühlern – Potenzial, Umsetzung und Wirtschaftlichkeit*. Aqua & Gas, (7/8), p. 50–57
- [7] Ernst Basler+Partner (2015): *Ressourceneffiziente ARA – Analyse von Potenzialen und Rahmenbedingungen zur Steigerung der Ressourcennutzung*. VSA
- [8] Henchoz, S. (2016): *Potential of refrigerant based district heating and cooling networks*. PhD, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne
- [9] Gaudard, A. et al. (2017): *Wärme- und Kältenutzung von Oberflächengewässern: mögliche physikalische und ökologische Auswirkungen*. Aqua & Gas, (5), p. 40–45

³ Wenn neben der Gewässerwärme auch die Elektrizität der Wärmepumpen aus erneuerbaren Quellen stammt.

- [10] Zogg, M. (2009): Wärmepumpen. «Geothermie – die Energie des 21. Jahrhunderts» Zertifikatslehrgang ETH
- [11] CH2014-Impacts (2014): Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland. OcCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agro-scope and ProClim, Bern, Switzerland
- [12] OcCC (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050: Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. Organe consultatif sur les changements climatiques, Bern
- [13] Kazi, S. N. (2012): Fouling and fouling mitigation on heat exchanger surfaces. INTECH Open Access Publisher
- [14] Wanner, O. (2004): Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen: Schlussbericht. Eawag
- [15] Ventura, L. D. et al. (2016): Overland transport of recreational boats as a spreading vector of zebra mussel *Dreissena polymorpha*. Biological Invasions. 18(5): p. 1451–1466
- [16] BFE (2017): Nutzung von Oberflächengewässern für thermische Netze. EnergieSchweiz
- [17] Fink, G. et al. (2014): Large lakes as sources and sinks of anthropogenic heat: Capacities and limits. Water Resources Research. 50(9): p. 7285–7301
- [18] Jaun, L.; Schmid, M. (2006): Temperaturveränderungen und Phosphat-Eintrag durch Kühlwassernutzung und Wärmeentnahme am Zugersee. Eawag, Kastanienbaum
- [19] Wüest, A.; Fink, G. (2014): Potential zur Wärme- und Kühlenergienutzung aus dem Vierwaldstättersee: Machbarkeit. Eawag, Kastanienbaum
- [20] Gaudard, A.; Bouffard, D.; Wüest, A. (2014): Alternatives for the development of the EPFL water intake in Lake Geneva. EPFL, Lausanne, APHYS-14-1
- [21] Gaudard, A. (2016): Wärme- und Kältenutzung aus Brienz-, Thuner- und Bielersee – Abschätzung des Potenzials und Beeinflussung der Seeökosysteme. Eawag, Kastanienbaum
- [22] Råman Vinnå, L. et al. (2017): Seewasserentnahme im Bielersee: Gibt es eine ideale Position? Aqua & Gas, (9), p. 14–20
- [23] Råman Vinnå, L. et al. (2017): Physical effects of thermal pollution in lakes. Water Resources Research. 53: p. 3968–3987
- [24] Gaudard, A. (2016): Wärme- und Kältenutzung aus Sempacher- und Baldeggerrsee – Abschätzung des Potenzials. Eawag, Kastanienbaum
- [25] Eawag: PEAK Kurs «Heizen und Kühlen mit Seen und Flüssen». Kastanienbaum, 08/11/2017
- [26] Vogelsanger, M. (2017): Einfach, schnell und planbar: Programm Wärmeverbünde. Aqua & Gas, (9), p. 97–100



Automatisierungslösungen, die perfekt passen.

Endress+Hauser ist der weltweite Hersteller mit dem kompletten Leistungsspektrum für die Prozessautomatisierung, von der voluminösen Feldinstrumentierung bis hin zu Automatisierungslösungen und attraktivem Life Cycle Management. Dabei sind alle Geräte, Komponenten und Systeme exakt aufeinander abgestimmt und arbeiten perfekt zusammen. Auf der ganzen Welt betreuen wir seit Jahrzehnten Kunden aus allen Branchen der Verfahrenstechnik. Als solides, finanzkräftiges und global agierendes Familienunternehmen mit 60 Jahren Erfahrung in der Prozessautomatisierung steht Endress+Hauser für Fairness und Verlässlichkeit, für langfristige Geschäftsbeziehungen, höchste Qualität im gesamten Leistungsangebot sowie für Innovationskraft und Technologieführerschaft.

aqua pro
gaz

Halle 20
Stand 20-84

Endress+Hauser (Schweiz) AG
Kägenstrasse 2
4153 Reinach
Schweiz
info@ch.endress.com
www.ch.endress.com

Endress+Hauser 
People for Process Automation