

14. März 2014

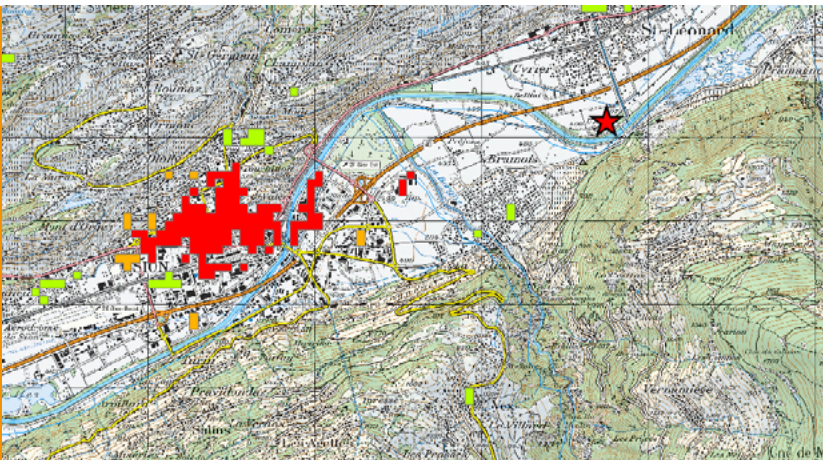
Weissbuch

Fernwärme Schweiz – VFS Strategie

Langfristperspektiven für erneuerbare und energieeffiziente Nah- und Fernwärme in der Schweiz

*Schlussbericht Phase 2:
GIS-Analyse und Potentialstudie*

Zertifiziert nach ISO 9001: 2008





Impressum

Projekt: 12.3156.1

Verfasser: Anton Sres

Telefon: 031 370 14 35

E-Mail: anton.sres@eicher-pauli.ch

Freigabe: Hanspeter Eicher, VR

Mitautoren: Beat Nussbaumer, SPL

Stand: 3. Fassung vom 12. März 2014

Auftraggeber

Verband Fernwärme Schweiz (VFS)

Walter Böhlen

Römerweg 2

5443 Niederrohrdorf

Mitfinanziert vom Bundesamt für Energie

Inhalt

| | | | |
|---|-----------|--|-----------|
| 1. Zusammenfassung | 4 | 5. Zukünftige Nah- und Fernwärmeversorgung | 46 |
| 1.1 Übersicht und Zielsetzung | 4 | 5.1 Methodik | 46 |
| 1.2 Ausgangslage und Annahmen | 4 | 5.1.1 Übersicht | 46 |
| 1.3 Vorgehen | 5 | 5.1.2 Prioritäten | 46 |
| 1.4 Abgrenzung | 5 | 5.1.3 Radiale Anschlussdichte | 47 |
| 1.5 Resultate | 6 | 5.2 Zuordnung von lokalisierten Energiequellen | 51 |
| 1.5.1 Geeignete Nah- und Fernwärmegebiete (Cluster) | 6 | 5.2.1 Zuordnung Kehrrechtverbrennungsanlagen (KVA) | 51 |
| 1.5.2 Potentiale erneuerbare Energien | 6 | 5.2.2 Zuordnung Grundwasser | 53 |
| 1.5.3 Zuordnung der Potentiale mit den Nah- und Fernwärmegebieten | 7 | 5.2.3 Zuordnung Abwasserreinigungsanlagen (ARA) | 54 |
| | | 5.2.4 Zuordnung Seen | 54 |
| | | 5.2.5 Zuordnung Flüsse | 55 |
| 2. Einleitung | 9 | 5.3 Zuordnung nicht lokalisierter Energiequellen | 57 |
| 2.1 Ausgangslage | 9 | 5.4 Resultat | 59 |
| 2.2 Zielsetzung | 9 | | |
| 2.3 Vorgehen | 9 | 6. Ausblick | 61 |
| | | | |
| 3. Geeignete Nah- und Fernwärmegebiete | 11 | A. Anhang | 62 |
| 3.1 Methodik | 11 | A.1 Literaturverzeichnis | 62 |
| 3.1.1 Wärmebedarf | 12 | A.2 Danksagung | 64 |
| 3.1.2 Gebäudebestand | 13 | | |
| 3.2 Cluster Analyse | 13 | | |
| 3.2.1 Wärmedichte | 14 | | |
| 3.2.2 Wirtschaftlichkeit | 14 | | |
| 3.2.3 Clusterbildung | 15 | | |
| 3.3 Resultate Clusteranalyse | 17 | | |
| 3.3.1 Grössenverteilung der Cluster | 17 | | |
| 3.3.2 Potential von Nah- und Fernwärme in der Schweiz | 18 | | |
| | | | |
| 4. Fernwärme mit erneuerbaren Energien | 20 | | |
| 4.1 Methodik | 20 | | |
| 4.2 Geografisch gebundene erneuerbare Energiequellen | 21 | | |
| 4.2.1 Kehrrechtverbrennungsanlagen (KVA) | 21 | | |
| 4.2.2 Abwärme Industrie | 23 | | |
| 4.2.3 Abwasserreinigungsanlagen (ARA) | 26 | | |
| 4.2.4 Grundwasser | 29 | | |
| 4.2.5 Seen | 32 | | |
| 4.2.6 Flüsse | 36 | | |
| 4.3 Geografisch nicht gebundene erneuerbare Energiequellen | 40 | | |
| 4.3.1 Energieholz | 40 | | |
| 4.3.2 Tiefengeothermie | 41 | | |
| 4.4 Wärmepotential erneuerbare Energiequellen | 43 | | |

1. Zusammenfassung

1.1 Übersicht und Zielsetzung

Erstmalige Verknüpfung der Potentiale erneuerbarer Energien mit dem Wärmebedarf von potentiellen Nah- und Fernwärmenetzen

Mit dem Projekt „GIS-Analyse und Potentialstudie - Phase 2“ wurde erstmalig für die Schweiz Quellen erneuerbarer Energien und Abwärme mit dem Wärmebedarf von potentiellen Nah- und Fernwärmeversorgungen unter Berücksichtigung von Potential und der geografischen Lage zueinander verknüpft. Gegenüber früheren Potentialbetrachtungen wurden die Daten aktualisiert und als Novität Industrieabwärme sowie Umweltwärme aus Seen und Flüssen berücksichtigt.

Die Analyse erfolgte auf der Basis von statistischen, georeferenzierten Daten und unter Anwendung bekannter wirtschaftlicher und technischer Kriterien.

Bestimmung potentieller Nah- und Fernwärmegebiete

Das erste Ziel war herauszufinden, welcher Anteil des gesamtschweizerischen Wärmebedarfs für Raumheizung und Warmwasser langfristig in Gebieten liegt, welche wegen ihrer hohen Wärmeverbrauchsichte primär über Nah- und Fernwärme versorgt werden müssen, da eine Versorgung mit erneuerbaren Energien über Einzelheizungen nicht oder schlecht möglich ist. Der Zeithorizont der Betrachtung liegt bei 2050.

Bestimmung potential bewährter erneuerbaren Energiequellen

Das zweite Ziel bestand darin, zu bestimmen, zu welchen Anteilen diese potentiellen Nah- und Fernwärmegebiete mit verschiedenen bewährten erneuerbaren Energiequellen versorgt werden können. Dazu sollte neben dem Potential der einzelnen Energiequellen auch die geografische Lage zu den Wärmenachfragegebieten berücksichtigt werden.

Schlussendlich soll mit dieser Studie untersucht werden, welche Bedeutung Nah- und Fernwärmenetze für die Energiewende aufweisen.

1.2 Ausgangslage und Annahmen

Die Grundlage der Analyse bildet der Gebäudebestand von 2010.

Bis 2050 ist eine Reduktion des Endenergiebedarfes für Raumheizung und Warmwasser um 50% notwendig

Um den zukünftigen Wärmebedarf abzuschätzen, gehen wir davon aus, dass um die Ziele der schweizerischen Energiepolitik zu erreichen, eine langfristige Reduktion des Endenergiebedarfes für Raumheizung und Warmwasser um 50%, bezogen auf 2010, notwendig ist. Eine Ausnahme ist die Industrie. Für sie setzten wir eine Reduktion von 20 % ein. In dieser Reduktion ist auch der Mehrverbrauch für die zu erstellenden Neubauten infolge des steigenden Bedarfs inbegriffen. Es wurden zudem keine Verdichtungen berücksichtigt. Damit ist die Analyse bewusst konservativ gehalten.

Bestehende Nah- und Fernwärmenetze konnten nicht berücksichtigt werden, da sie schweizweit nicht erfasst sind. Das gleiche gilt für Erdgasnetze und lokale Energieplanungen.

1.3 Vorgehen

Da die geographische Verteilung von Wärmenachfrage und Wärmeangebot eine zentrale Rolle spielt, wurde für die Analyse ein geographisches Informationssystem (GIS) verwendet. Dabei wurden vorhandene Analysetools wie auch neu entwickelten Algorithmen verwendet.

Die Verbrauchsdaten für Raumwärme und Warmwasser für die Kategorien Wohnen, Dienstleistung und Industrie (ohne Prozesswärme) standen mit einer Auflösung von 100 x 100 Meter (Hektaren) für die ganze Schweiz zur Verfügung. In einem ersten Schritt wurden diese Verbrauchsdaten entsprechend den Annahmen für 2050 reduziert.

Aus diesen Hektardaten konnten anschliessend mit einem bestehenden, leicht modifizierten Wärmeverteilungskostenmodell mittels GIS-Analyse Nah- und Fernwärmegebiete (Cluster) identifiziert werden, in welchen sich Wärmeverteilungskosten von maximal 4.5 Rp/kWh ergeben. Damit lassen sich nach Erfahrungen aus der Praxis Wärmepreise für die Endkunden erzielen, die bei den heutigen fossilen Energiepreisen und der Internalisierung der externen Kosten fossiler Energieträger in vielen Fällen wirtschaftlich sein werden.

Vor der Zuordnung der Wärmequellen zu den identifizierten Nah- und Fernwärmegebieten, musste deren Potential und Standort ermittelt werden. Dabei wurden folgende Wärmequellen berücksichtigt:

1. Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA)
2. Abwärme industrieller Prozesse (AW)
3. Grundwasser (GW)
4. Abwasserreinigungsanlagen (ARA)
5. Seen
6. Flüsse
7. Holz
8. Tiefengeothermie

Während die Nutzung der Wärmequellen 1 bis 6 an deren Standort gebunden ist, sind Holz und Tiefengeothermie geographisch ungebunden und können damit überall eingesetzt werden.

Im letzten Schritt wurde schliesslich mit dem entwickelten GIS Modell den identifizierten Nah- und Fernwärmegebieten erneuerbare Wärmequellen zugeordnet.

Potentielle Nah- und Fernwärmegebiet mit Wärmeverteilungskosten weniger 4.5 Rp/kWh identifiziert

Unterscheidung von geographisch gebundenen und ungebundenen erneuerbaren Energiequellen

1.4 Abgrenzung

Die gewählte Vorgehensweise hat klar ihre Grenzen und kann zum Beispiel nicht mit einer regionalen Energierichtplanung verglichen werden. So konnte nicht auf lokale Versorgungsstrategien oder bereits vorliegende Verbundnetze eingegangen werden.

Die erhaltenen Resultate liefern aber trotzdem eine interessante, gesamtschweizerische Sicht, welche noch verfeinert und lokal an die beste wirtschaftliche Gegebenheit angepasst werden muss. Vor allem dann, wenn an einem Standort mehrere

Die Arbeit hat klar Grenzen und kann nicht mit regionaler Energieplanung verglichen werden

Wärmequellen miteinander in Konkurrenz stehen, so zum Beispiel Umweltwärme aus Seen und Abwärme aus Abwasserreinigungsanlagen. Ein anderes, typisches Beispiel ist Umweltwärme aus Grundwasser sowie Abwärme aus Kehrlichtverbrennungsanlagen.

Verschiebungen zwischen den einzelnen Wärmequellen werden sich auch noch ergeben, wenn zum Beispiel der Kältebedarf berücksichtigt wird, da nicht alle Wärmequellen gleichzeitig auch die gleiche Eignung als „Kältequellen“ aufweisen. Die ermittelten Nah- und Fernwärmegebiete müssen auch nicht zwingend als solche umgesetzt werden. Es kann durchaus sein, dass vereinzelt Lösungen mit Einzelheizungen auf der Basis erneuerbaren Wärmequellen wirtschaftlich attraktiver sind. Hier müssen lokale Betrachtungen im Rahmen von Energierichtplänen entscheiden.

1.5 Resultate

1.5.1 Geeignete Nah- und Fernwärmegebiete (Cluster)

Rund 5'500 Wärmenetze wurden identifiziert

Die Zusammenführung von Wärme-Hektaren mit ausreichenden Wärmedichten führt zu rund 5'500 geeigneten „Clustern“. Dabei weisen rund 10 „Mega-Cluster“ einen Bedarf von 100 bis 1'400 GWh aus.

Der Komfortwärmebedarf von heute 85 TWh pro Jahr reduziert sich bei unseren Annahmen im Jahr 2050 auf 45 TWh/a.

38% des Komfort-Wärmebedarfes können über Wärmenetze mit erneuerbaren Energien wirtschaftlich versorgt werden

Davon können in den oben genannten Clustern 17 TWh/a abgesetzt werden. Dies bedeutet, dass in Zukunft mit geeigneten Rahmenbedingungen bis zu 38% des gesamtschweizerischen Wärmebedarfs für Raumheizung und Warmwasser wirtschaftlich über Nah- und Fernwärmenetze versorgt werden können.

1.5.2 Potentiale erneuerbare Energien

Das Potential der betrachteten erneuerbaren Energien liegt bei total 238 TWh/a und übersteigt damit den Bedarf im 2050 um den Faktor 5.

Grosses Wärmepotential liegt bei Seen

Erstaunlich ist das grosse Wärmepotential, das bei den Seen ausgemacht werden konnte. Die Tatsache, dass Seewasser auch zur Kühlung genutzt werden kann, macht es für die Energienutzung umso interessanter. Der zusätzliche Nutzen für die Kühlung konnte nicht berücksichtigt werden, da in den zur Verfügung stehenden Verbrauchsdaten keine Angaben über den Kühlbedarf vorhanden sind.

Abwärmepotential ist erheblich

Das Abwärmepotential aus industriellen Prozessen konnte nur grob abgeschätzt werden, da ausser vom Kanton Wallis keine genauen Erhungen bekannt sind. Das erhaltene Potential von 3.6 TWh/a ist erheblich und in etwa mit der Abwärme aus Kehrlichtverbrennungsanlagen vergleichbar.

1.5.3 Zuordnung der Potentiale mit den Nah- und Fernwärmegebieten

Nachfolgend ist die Zuteilung der vorhandenen Potentiale erneuerbarer Energien auf die Nah- und Fernwärmegebiete aufgeführt. Die Zuteilung erfolgte dabei gemäss der im Hauptbericht dargelegten Priorisierung und Algorithmen.

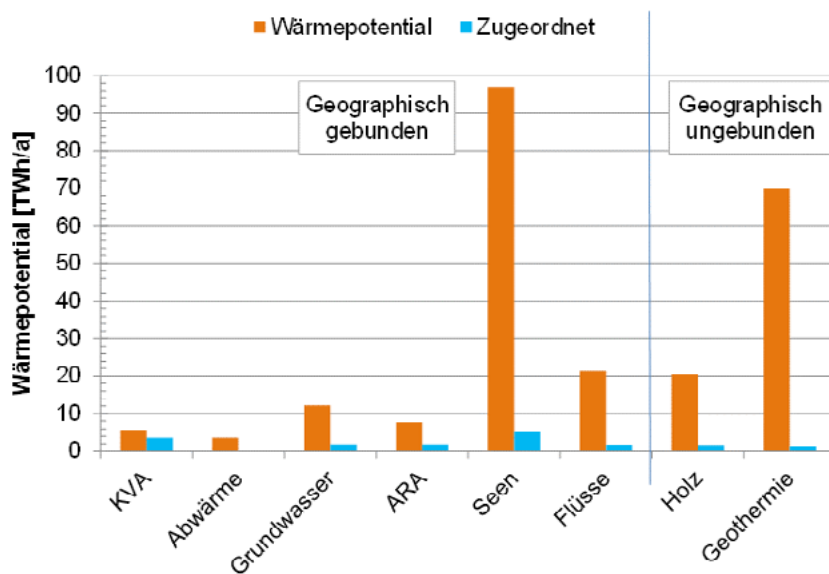


Bild 1: Wärmpotential Energiequellen (orange) und den Nah- und Fernwärmegebieten zugeordneter Absatz (hellblau)

Unter den getroffenen Annahmen können die gesamten 17 TWh/a der potentiellen Nah- und Fernwärmegebiete mit den vorgestellten erneuerbaren Wärmequellen versorgt werden. Die Aufteilung ist im folgenden Bild dargestellt.

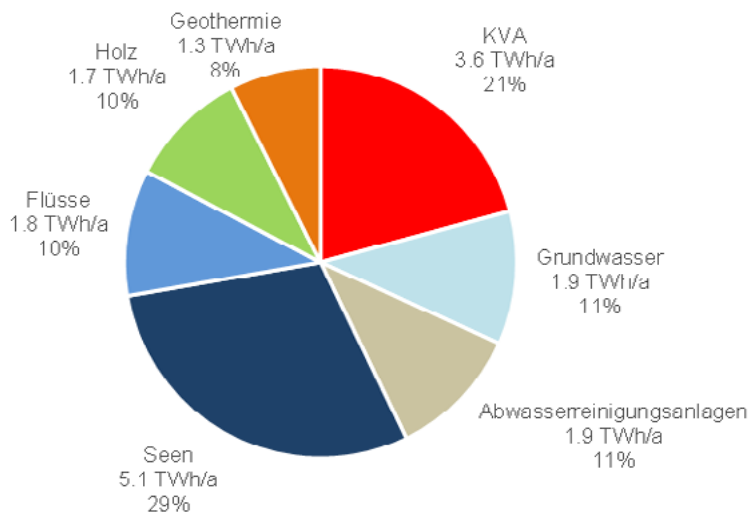


Bild 2: Aufteilung der zugeordneten Wärmequellen am Nah- und Fernwärmepote

Abfall zukünftig dort verbrennen, wo hohe Abwärmenutzung möglich

Das Abwärmepotential der aktuellen Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) kann wirtschaftlich mit Wärmeverbänden teilweise ausgeschöpft werden. Ein Teil der untersuchten Standorte haben zu lange Distanzen zu den Clustern um mit ihnen verbunden zu werden. Die Abwärme geht dort ungenutzt verloren. Dieser Verlust könnte reduziert werden, wenn der Abfall zukünftig vermehrt dort verbrannt wird, wo eine höhere Abwärme-nutzung möglich wäre.

Für Abwärmepotential der Industrie sind zusätzliche Abklärungen notwendig

Die Abwärmepotentiale der Industrie konnten wohl mit Modellbetrachtungen allgemein abgeschätzt werden, mussten jedoch wegen fehlender Lokalisierung vorerst aus der Clusterzuteilung ausgeklammert werden. Hier sind zusätzliche Abklärungen notwendig, um die Bedeutung des wirtschaftlich interessanten Potentials der industriellen Abwärmenutzung besser einschätzen zu können.

Grosse Oberflächengewässer und Grundwasser haben eine zentrale Bedeutung

Bisher kaum in Betrachtung gezogen wurde die Wärmenutzung aus Seen und grossen Fließgewässern, welche zusammen 6.9 TWh/a Umweltwärme liefern können, was 39% der gesamten erneuerbaren Nah- und Fernwärme ausmacht. Zusammen mit dem Grundwasser, welches zur gleichen Kategorie erneuerbarer Wärmequellen gehört, ergeben sich sogar 8.8 TWh/a, respektive 50% der gesamten Nachfrage. Berücksichtigt man noch die Tatsache, dass diese drei erneuerbaren Wärmequellen gleichzeitig auch erneuerbare Kältequellen sind, zeigt dies die zentrale Bedeutung dieses bisher noch vernachlässigten, erneuerbaren Energieträgers.

Verschiedene Optionen zur Deckung der fehlenden 3 TWh/a

Nach Berücksichtigung der Abwärmenutzung aus Abwasserreinigungsanlagen, welche knapp 2 TWh/a oder 11% beitragen kann, fehlen noch 3 TWh/a, um die gesamte Nachfrage in den potentiellen Nah- und Fernwärmegebieten decken zu können. Zur Deckung dieses Fehlbetrags bestehen verschiedene Optionen:

- Ein noch unbekannter Teil kann die Abwärmenutzung aus industriellen Prozessen beitragen. Bevor eine entsprechende Abschätzung möglich ist, muss aber noch eine Potentialabklärung mit geographischer Zuordnung erfolgen.
- Längerfristig könnte auch die Geothermie einen Anteil liefern. Die Voraussetzung ist allerdings, dass die Kosten auf ein bezahlbares Niveau sinken. Dann wäre auch denkbar, dass in den bereits aufgebauten Nah- und Fernwärmenetzen die Geothermie den Teil der andern erneuerbaren Energieträger oder Abwärmenutzungen ersetzen könnte.
- Holz kann überall eingesetzt werden. Da es aber zu wertvoll für reine Raumheizung und Warmwasseraufbereitung ist, sollte es möglichst nicht, oder nur bei gleichzeitiger Stromerzeugung, eingesetzt werden.
- Ein Teil des fehlenden Deckungsanteils ergibt sich zudem in Clustern mit einem Wärmeleistungsbedarf von unter 500 kW. Diese könnten auch in kleinen Wärmeversorgungen mit bivalenten Anlagen gedeckt werden, die mit Erdsonden oder sogar mit Aussenluft als Wärmequelle arbeiten.

2. Einleitung

2.1 Ausgangslage

Im Energie- und Umweltbereich haben Bundesrat und Parlament 2011 weitreichende Entscheide gefällt. Einerseits wurde mit dem CO₂-Gesetz eine inländische Reduktion der CO₂-Emissionen von 20% bis 2020 gegenüber 1990 festgelegt, andererseits mittelfristig der Ausstieg aus der Kernenergie beschlossen. Damit steht in der Schweiz neben anspruchsvollen Effizienzmassnahmen ein grosser Umbau der Energieversorgung an, welcher unter anderem einen massiven Ausbau der Nutzung von erneuerbaren Energien bedingt.

Im Wärmebereich bedingt die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien vor allem im dicht umbauten Raum den Einsatz von Wärmeverteilnetzen, da es bei hohen Verbrauchsdichten vielfach nicht oder nur schwer möglich ist, Einzelheizungen mit erneuerbaren Energien zu realisieren. Beispiele dafür sind die Nutzung von geographisch gebundenen Abwärmequellen aus Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA), Abwasserreinigungsanlagen (ARA) oder der Industrie sowie Wärmenutzung aus Grund- oder Oberflächenwasser. Weiter gehören auch Anlagen dazu, welche grösstenbedingt auf einen hohen Wärmeabsatz angewiesen sind, wie zum Beispiel tiefe Geothermie oder grosse Biomasseanlagen.

Die eingeleitete Energiewende bedingt einen massiven Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien

Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien setzt effiziente und wirtschaftliche Wärmeverteilnetze voraus

2.2 Zielsetzung

Der Verband „Fernwärme Schweiz“ (VFS) will zusammen mit Partnern die Realisierung von solchen Nah- und Fernwärmenetzen zur sinnvollen Nutzung von erneuerbarer Energien und Abwärmequellen fördern. Mit dieser Arbeit sollen Grundlagen und Arbeitsinstrumente erarbeitet, das Potential erneuerbarer Nah- und Fernwärme abgeschätzt und die für die Nutzung geeigneten Gebiete identifiziert werden.

Zur Nutzung von Synergien sollen im Anschluss an diese Arbeiten geeignete Daten und Potentialabschätzungen in das webGIS¹ des VFS übertragen werden. Damit werden die Ergebnisse einem breiten Nutzerspektrum zugänglich gemacht und die Umsetzung beschleunigt.

Erarbeitung notwendiger Grundlagen, Ermittlung der Potentiale und Bereitstellung geeigneter breit zugänglicher Arbeitsinstrumente

2.3 Vorgehen

Die gesamte Projektabwicklung wurde in die folgenden drei Phasen gegliedert:

- **Phase 1:** Aktualisierung des bestehenden webGIS des VFS mit aktuellen Verbrauchsdaten im Wohn-, Dienstleistungs- und Industriebereich. Diese Arbeiten wurden im Auftrag des VFS durch Eicher+Pauli im Herbst 2012 abgeschlossen.
- **Phase 2:** Ermittlung geeigneter Gebiete (Cluster) für zukünftige Nah- und Fernwärmeversorgungen mit erneuerbaren Energien und deren geographischen Kennzeichnung im webGIS.
- **Phase 3:** Umsetzung: Zusammen mit Partnern initiiert der VFS Nah- und Fernwärmeprojekte als geeignet ausgewiesenen Gebieten.

Vorgehen in drei Phasen, wobei vorliegende Phase 2 das Kernelement bildet

¹ Das WebGIS ist ein internetbasiertes GIS Tool zur Projektentwicklung im Fernwärmebereich. Es ist ausführlich beschrieben in (33) und als Demo auf der Homepage des VFS (<http://www.fernwaerme-schweiz.ch>) jedermann zugänglich.

Analyse der geografisch gebundenen Wärme-nachfrage und Zuordnung mit dem Angebot erneuerbarer Energien

Die vorliegend rapportierten Arbeiten umfassen die Phase 2. Die Umsetzung erfolgte nach den folgenden Schritten:

- a. Bestimmung des Potentials von Nah- und Fernwärme durch Identifizierung von Gebieten mit geeigneten Wärmebedarfsdichten (bestehende, sanierte Gebäude).
- b. Geographische und mengenmässige Erfassung des Potentials von erneuerbaren Energien, welche für die Nah- und Fernwärmeversorgung geeignet ist.
- c. Zuordnung der geeigneten Nah- und Fernwärmegebiete zu den Potentialen erneuerbarer Energien mittels GIS Algorithmen.

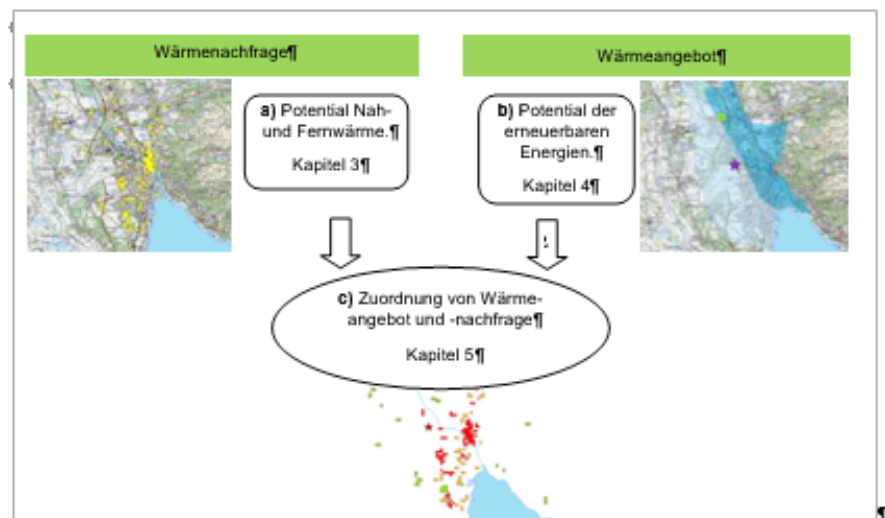


Bild 3: Schematisch Darstellung Vorgehen Phase 2

Es muss vorausgeschickt werden, dass die durchgeführten Analysen und die Zuordnung im Rahmen einer grundsätzlichen Potentialermittlung erfolgen und in keiner Weise eine Planung im Sinne z.B. von Energie-richtplänen ersetzen kann.

3. Geeignete Nah- und Fernwärmegebiete

3.1 Methodik

Die Basis zur Ermittlung von geeigneten Nah- und Fernwärmegebieten bilden die Daten des webGIS vom VFS. Sie enthalten Informationen zur Gebäudenutzung (Wohnen, Dienstleistung und Industrie) und deren Wärmebedarf. Die Grundlagen dieser georeferenzierten Daten bilden folgende Statistiken:

- Betriebszählung 2008, Bundesamt für Statistik
- Gebäude- und Wohnungsstatistik 2010, Bundesamt für Statistik
- Gesamtenergiestatistik Schweiz, 2010
- Energieverbrauch Industrie und Dienstleistungssektor 2010, Helbling

Zusammenführung von Gebäude-, Energie- und Industriedaten zu Wärmebedarf pro Hektare

Die Informationen liegen nicht „objektscharf“ vor, sondern sind aus Datenschutzgründen auf jeweils eine Hektare (100 x100 Meter) aggregiert. In Bild 4 ist ein solches Wärme-Hektarraster dargestellt. Zu beachten ist, dass der ausgewiesene Wärmebedarf auf einen durchgängig sanierten Gebäudebestand umgerechnet wurde.

Die Daten wurden aus dem webGIS in ein für die Analysen geeignetes Geoinformationssystem (ArcGIS 10) überführt, wo sie als erstes für die Analyse aufbereitet wurden.

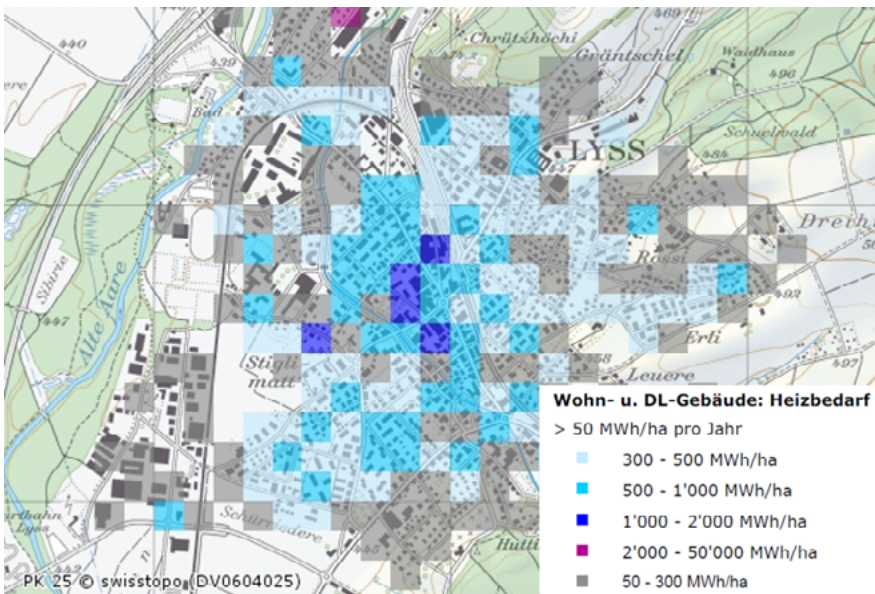


Bild 4: Bild aus dem webGIS des VFS mit Wärmebedarf von Wohn- und Dienstleistungsgebäuden in der Auflösung eines Hektarraster

3.1.1 Wärmebedarf

Prozesswärmebedarf der Industrie wurde ausgeklammert

Die Datenaufbereitung umfasste als erstes eine Bereinigung des Wärmebedarfs der Industrie, indem die Prozesswärme ausgeklammert wurde. Diese bedingt in der Regel ein (hohes) Temperaturniveau, welches für Nah- und Fernwärme mit erneuerbaren Energieerzeugern, wie Wärmepumpen, nicht geeignet ist.

Als Grundlage zur Differenzierung der Prozesswärme konnte auf eine Studie von Wagner (1) zurückgegriffen werden. Er untersuchte die Verteilung des Wärmebedarfs verschiedener Branchen der deutschen Industrie hinsichtlich der benötigten Temperaturniveaus. Das Resultat ist in Bild 5 dargestellt.

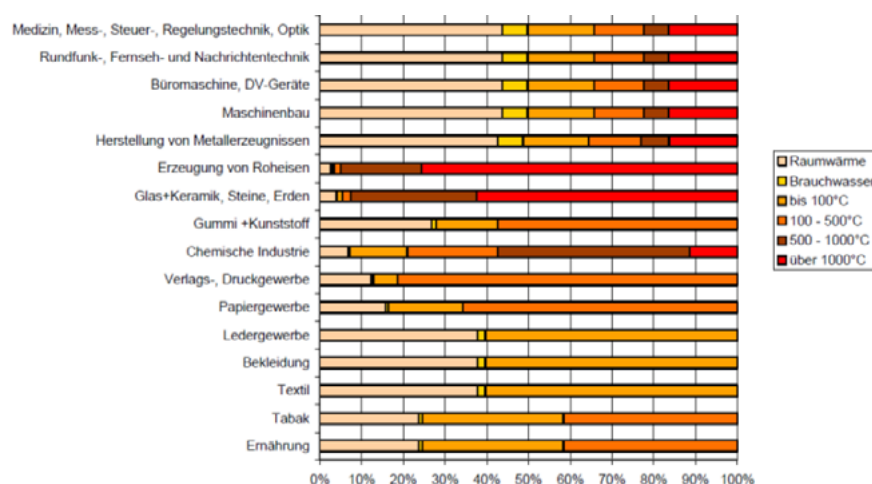


Bild 5: Aufteilung des Wärmebedarfs nach Temperaturniveaus in der deutschen Industrie (aus Wagner (1))

Branchenzuteilung nach NOGA

Mit der Annahme, dass in der Schweiz dieselben Prozesse zur Anwendung gelangen, wurden diese Aufteilungen zur Differenzierung der Raumwärme verwendet. Die Branchenaufteilung konnte mit der Schweizerischen NOGA-Zuteilung in Übereinstimmung gebracht werden.

In einem zweiten Schritt musste der Wärmebedarf mit Annahmen über die Entwicklung der Wärmenachfrage bis ins Jahr 2050 reduziert werden. Damit soll sichergestellt werden, dass die ermittelten Cluster auch langfristig wirtschaftlich mit Nah- resp. Fernwärme versorgt werden können.

Wie sich der Wärmebedarf entwickeln wird, hängt von verschiedenen Parametern und Randbedingungen ab. Prognos hat sie in den Energie-perspektiven für die Schweiz 2050 (2) ausführlich untersucht. Wie auch immer diese sein werden resp. sein müssen, klar ist, dass die Ziele der Energieversorgung nur durch umfangreiche Effizienzmassnahmen erreicht werden können. Analog den Überlegungen von (3) gehen wir von folgenden Annahmen aus:

- Reduktion des Wärmebedarfes für Heizen und Warmwasser in den Nutzungen Wohnen und Dienstleistung um 50%.
- Reduktion des Wärmebedarfes für Heizen und Warmwasser in der Industrie um 20%.

**Reduktion Wärmebedarf Wohnen und Dienstleistung um rund 50%,
Reduktion Industrie um 20%**

Die Reduktion bezieht sich dabei auf den Stand des Energieverbrauches von 2010 und wird pauschal ohne weitere Differenzierungen (wie Gebäudealter etc.) angewendet.

3.1.2 Gebäudebestand

Die GIS-Analyse umfasst den Gebäudebestand von 2010. Neubauten infolge Bevölkerungszuwachses werden pauschal in der Reduktion von 50% berücksichtigt, das heisst, dass die effektive Reduktion in den bestehenden Objekten grösser als 50% sein muss. Diese Einschränkung ist bei Gegenüberstellungen mit analogen, zukunftsgerichteten Potentialabschätzungen zu beachten. Diese restriktive Sichtweise vermeidet jedoch, dass die Potentiale überschätzt werden. Im gleichen Sinne wurden auch keine von der Raumplanung geforderten Verdichtungen in die Betrachtung einbezogen. Die Hochrechnung kann damit als sehr konservativ eingestuft werden.

Gebäudebestand von 2010 mit Reduktion von 50% berücksichtigt

Als letzter Schritt wurden mittels GIS-Analyse aus den Wärmebedarfsdaten jene Hektaren ermittelt, welche eine ausreichende Wärmedichte für ein Nah- und Fernwärmegebiet aufweisen und, falls sinnvoll, zu zusammenhängenden Gebieten zusammengefügt („Cluster“). Dazu wurde das Wärmeverteilungskostenmodell aus der Studie (4) leicht modifiziert angewendet.

Als Resultat der Analyse werden Cluster ausgewiesen, welche sich für eine zukünftige Fern- und Nahwärmeversorgung eignen (Auswertung Kapitel 3.3). Hektaren < 150 MWh/ha in Analyse nicht berücksichtigt

3.2 Cluster Analyse

Die Clusterbildung erfolgte auf der Basis des bestehenden, leicht modifizierten Wärmeverteilungskostenmodells aus Studie (5). Gute Voraussetzungen für zukünftige Nah- und Fernwärmeversorgungen sind Gebiete mit hohem spezifischen Wärmebedarf, d.h. wo viel Wärme auf kleiner Fläche mit wenig Leitungslänge abgesetzt werden kann. Diese Voraussetzungen sind bei Hektaren mit weniger als 150 MWh/a pro Hektare nicht mehr gegeben. Diese wurden deshalb aus der Analyse ausgeschlossen.

Hektaren < 150 MWh/ha in Analyse nicht berücksichtigt

**Drei Kategorien für
Bebauungsdichte**

3.2.1 Wärmedichte

Der spezifische Wärmebedarf hängt mit der Bebauungsdichte zusammen, welche wiederum die Leitungskosten beeinflusst. Im städtischen Raum sind die Investitionen in den Leitungsbau gegenüber ländlichen Gebieten deutlich höher. Das Modell berücksichtigt diesen Sachverhalt, indem jede Hektare einer der Kategorien „Land“, „Agglomeration“ und „Stadt“ zugewiesen wird. Die Zuteilung erfolgt aufgrund des spezifischen Wärmebedarfes und der Lage zueinander nach folgenden Kriterien:

- Hektarkategorie „**Stadt**“: zwei und mehr zusammenhängende Hektaren mit spezifischem Wärmebedarf grösser oder gleich 800 MWh pro Hektare und Jahr
- Hektarkategorie „**Agglomeration**“: mehr als zwei zusammenhängende Hektaren mit spezifischem Wärmebedarf zwischen 400 und 800 MWh pro Hektare und Jahr
- Hektarkategorie „**Land**“: restliche zusammenhängende Hektaren zwischen 150 und 400 MWh pro Hektare und einzelne mit 150 MWh und mehr.

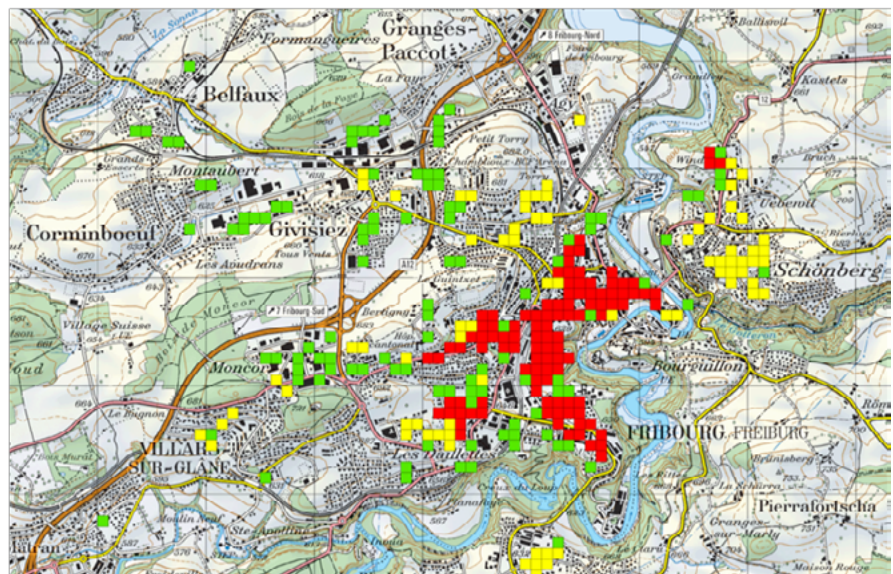


Bild 6: Hektaren der Kategorie Stadt (rot), Agglomeration (gelb) und Land (grün)

3.2.2 Wirtschaftlichkeit

Der Fernwärmepreis setzt sich zusammen aus den Energiekosten sowie den Kosten für die Wärmeerzeugung und -verteilung. Damit die Nah- und Fernwärme gegenüber dezentralen Wärmeerzeugungen überhaupt konkurrenzfähig sein kann, dürfen die Wärmeverteilungskosten (Netzbeitrag) nicht zu hoch sein.

**Wärmeverteilungskosten maximal bis
4.5 Rp/kWh**

Verschiedene Arbeiten (siehe z.B. (6) und (7)) weisen Wärmeverteilungskosten von rund 4.0 Rp/kWh als Grenze für die Wirtschaftlichkeit an. Die Arbeit von (8) weist aus, dass es auch bestehende Nah- und Fernwärmenetze mit höheren Verteilungskosten gibt, die z.T. aus energiepolitischen Gründen akzeptiert wurden. Der vorliegenden Analyse wurden vor diesem Hintergrund als obere Grenze 4.5 Rp/kWh festgelegt und konnten so bestehende Parameter direkt vom vorhandenen Modell übernehmen.

Dem Wärmeverteilkostenmodell liegt eine Wärmeverteilung nach bewährter konventioneller Technik zugrunde. Das heisst, dass die Wärme in einem geschlossenen Verteilnetz mit Warmwasser von 70-90°C verteilt wird und mit tiefen Rücklauftemperaturen um rund 40°C zurückfliesst. Damit wurden die Leitungsdimensionen für die Abschätzung der Investitionen festgelegt.

**Konventionelle
Wärmeverteiltechnik mit
Warmwasser bis 90°C**

Die Wärmeverteilkosten hängen mit dem spezifischen Wärmebedarf der jeweiligen Hektare zusammen. Je höher der spezifische Bedarf liegt, desto tiefer sind die Wärmeverteilkosten. Basierend auf typischen Netztopologien und Trassenmeterpreisen, wie sie uns aus diversen Fernwärmeprojekten vorliegen, wurde für die drei Kategorien jeweils der spezifische Wärmebedarf ermittelt, bei dem die Wärmeverteilkosten bei den rund 4.5 Rp/kWh liegen.

**Zusammenführung von Hektaren
zu Cluster mit wirtschaftlichen
Wärmeverteilungen**

Mit diesen Grenzwerten lassen sich jene Hektaren bestimmen, welche sich mit Wärmeverteilkosten kleiner gleich 4.5 Rp/kWh zu Clustern zusammenschliessen lassen.

3.2.3 Clusterbildung

Zur Identifikation von Cluster mussten geeignete Hektaren gefunden werden, welche sich mit Wärmeverbundleitungen zusammenführen lassen. Es wird dabei allen Hektaren in Abhängigkeit ihrer jeweiligen Wärmedichte ein Suchradius zugeordnet (siehe Bild 7), innerhalb welchem es sich ökonomisch lohnt, das Netz auszuweiten. Darauf werden alle sich mit ihrem Suchradius überlappenden Hektaren zu einem Cluster zusammengefügt.

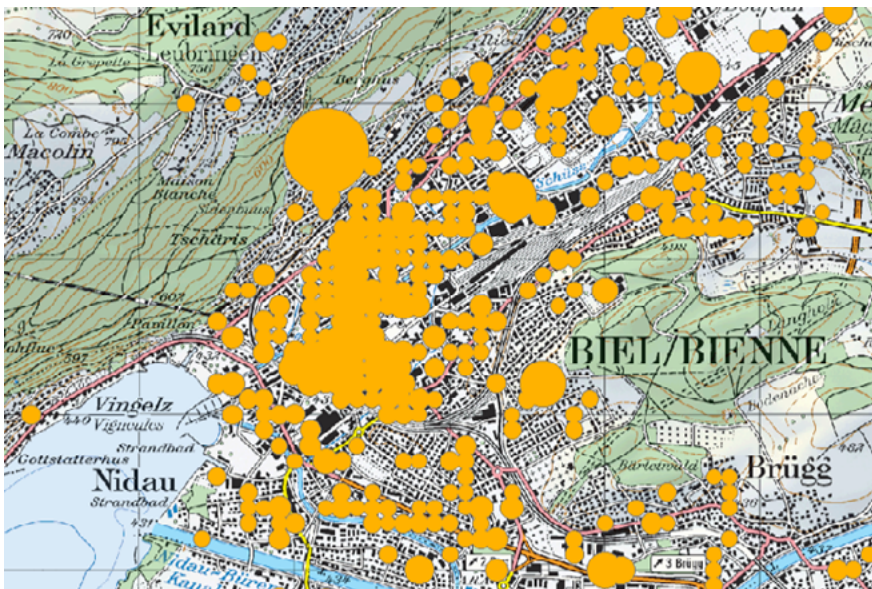


Bild 7: Clusterbildung: überlappende Gebiete werden zu Cluster zusammengefasst

Abschliessend wurden die verbleibenden Einzelhektaren aus der Betrachtung ausgeschlossen, welche nicht in das „Profil“ eines Nah- und Fernwärmeverbundes passen. Orientiert haben wir uns an nachfolgender Definition von Fernwärme:

„Wird Wärme von einem Dritten nach unternehmenswirtschaftlichen Gesichtspunkten eigenständig produziert und an andere geliefert, so handelt es sich um Fernwärme. Auf die Nähe der Anlage zu den zu versorgenden Gebäuden oder das Vorhandensein eines grösseren Leitungsnetzes kommt es nicht an.“

Ausschluss von Einzel-Hektaren, welche der Definition Fernwärme nicht genügen

Es genügt somit, wenn nur ein Bezüger an eine Heizzentrale angeschlossen ist und er für die Wärme bezahlt. Hingegen fällt eine Überbauung, die eine gemeinsame Zentrale hat und nur einem einzigen Besitzer gehört, nicht unter diese Definition. Dies gilt auch für Industrieareale oder Kliniken. Aus allen Einzel-Hektaren wurden somit jene ausgeschlossen welche:

- *nur aus einem Wohngebäude bestehen (Hochhaus);*
- *nur die Nutzung Industrie ausweisen (Annahme: nur ein Besitzer);*
- *nur die Nutzung Dienstleistung ausweisen (Annahme: nur ein Besitzer, z.B. freistehende Hotels);*
- *nur die Nutzung Dienstleistung und unter 5 Wohnungen ausweisen (Annahme: ein Besitzer, z.B. typisches Muster für Spitäler und psychiatrische Kliniken).*

3.3 Resultate Clusteranalyse

3.3.1 Grössenverteilung der Cluster

Als Ergebnis der Clusteranalyse im GIS resultieren rund 5'500 Cluster resp. potentielle Nah- und Fernwärmegebiete. Die Grössenverteilung der Cluster ist im Bild 8 dargestellt. Es erstaunt nicht, dass sich in Städten mit bestehenden Nah- und Fernwärmenetzen die grössten Cluster bilden. Diese decken Fläche zwischen 500 bis über 1'300 ha ab.

Rund 5'500 Cluster resp. Wärmeverbände werden ausgewiesen

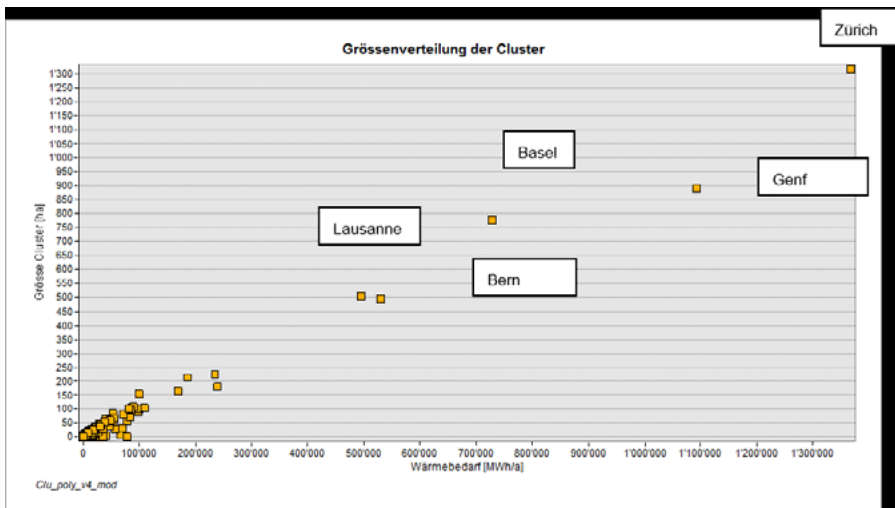


Bild 8: Grössenverteilung der ermittelten Cluster (Wärmebedarf pro Jahr und Fläche).

Bei Clustern mit einem Wärmebedarf von über 100 GWh pro Jahr sprechen wir von einem Mega-Cluster.

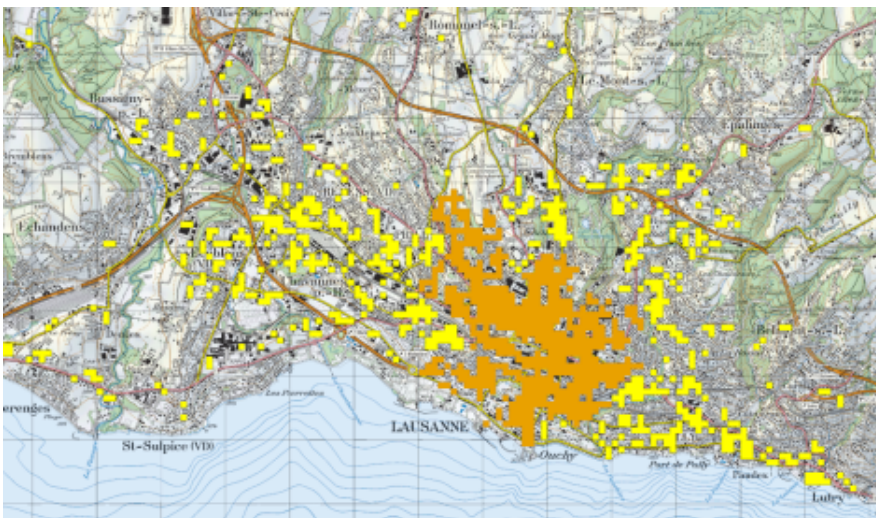


Bild 9: Beispiel eines Megacluster in Lausanne (orange eingefärbte Hektaren).

Der Wärmebedarf 2050 der Schweiz lässt sich bis zu 38 % mit Nah- und Fernwärme wirtschaftlich versorgen

3.3.2 Potential von Nah- und Fernwärme in der Schweiz

Aus der Summe der erhaltenden Cluster lässt sich das gesuchte Potential „Fernwärme Schweiz“ ableiten. Der gesamte im webGIS erfasste Wärmebedarf betrug 2010 rund 85 TWh/a.

Mit den Annahmen für die Reduktion des Wärmebedarfs von 50% in Wohnungen und Dienstleistung, sowie von 20% in der Industrie sinkt er im Jahr 2050 auf rund 45 TWh/a.

Davon lassen sich gemäss vorliegender Clusteranalyse rund 17 TWh/a mit Fernwärme versorgen, also 38%.

| | |
|---|--------|
| Wärmebedarf Heizen und Warmwasser 2010 | 85 TWh |
| Wärmebedarf Heizen und Warmwasser 2050 | 45 TWh |
| Wärmebedarf potentieller Nah- und Fernwärmegebiete 2050 | 17 TWh |

Tabelle 1: Entwicklung vom Wärmebedarf der Schweiz im Modell und potentieller Wärmebedarf der ermittelten Nah- und Fernwärmegebiete

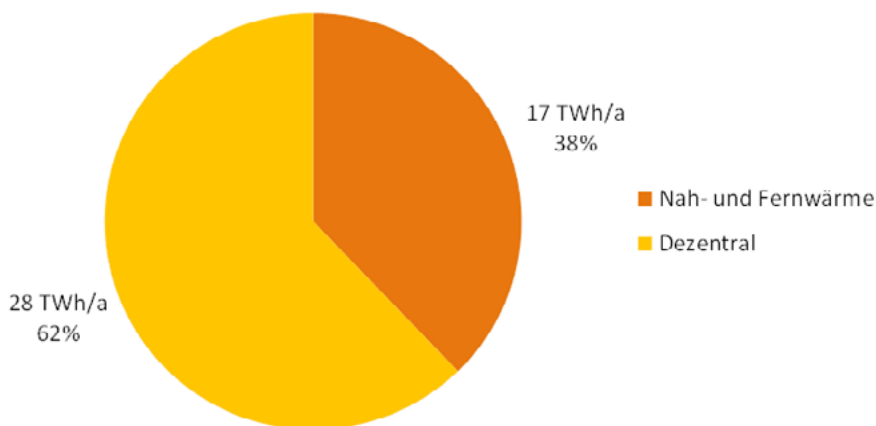


Bild 10: Möglicher Anteil Nah- und Fernwärme in der Schweiz 2050.

Das ausgewiesene Potential mit einem Anteil von 38% ist im internationalen Vergleich nicht viel. In nordischen Ländern wie Dänemark oder Schweden ist der Anteil bereits heute deutlich höher, wie die Tabelle 2 zeigt.

Im europäischen Vergleich liegt der Fernwärmeanteil in der Schweiz tief

| Land (Bezug Prozentangabe) | Anteil mit Fernwärme 2010 |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| Schweiz (Wohngebäude) | 4 % |
| Deutschland (Wohnungen) | 14 % |
| Österreich (Wohnungen) | 21 % |
| Dänemark (Gebäude) | 50 % |

Tabelle 2: Stand Fernwärmeversorgung 2010 im europäischen Vergleich

4. Fernwärme mit erneuerbaren Energien

4.1 Methodik

Geografische Referenzierung ortsgebundener erneuerbarer Energiequellen

Nach der Abschätzung des Wärmepotentials von Nah- und Fernwärme geht es in diesem Teil um die Ermittlung der nutzbaren erneuerbaren Energiequellen mit der die Nah- und Fernwärmegebiete versorgt werden können. Berücksichtigt wurden jene, welche bereits heute erfolgreich und wirtschaftlich mit bewährten Technologien im Einsatz sind. Eine Ausnahme bildet die Tiefengeothermie, deren Technologie noch weiterentwickelt werden muss.

Grundsätzlich ist zwischen geografisch gebundene und ungebundene Energiequelle zu unterscheiden. Gebunden bedeutet, dass sie nur örtlich begrenzt vorhanden ist und auch nur dort in der Umgebung genutzt werden kann. Dies ist z. B. bei einer Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) der Fall. Die am Standort erzeugte Wärme kann nur begrenzt mit Fernleitungen wirtschaftlich verteilt resp. genutzt werden. Energieholz hingegen kann überall hin transportiert werden und ist damit geografisch ungebunden. Die folgende Liste zeigt die betrachteten erneuerbaren Energiequellen getrennt nach den beiden Kategorien:

Geografisch gebundene, erneuerbare Energiequellen

1. Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA)
2. Abwärme aus Industriebetrieben und Kälteanlagen
3. Abwasserreinigungsanlagen (ARA)
4. Grundwasser
5. Oberflächengewässer

Geografisch ungebundene, erneuerbare Energiequellen

6. Energieholz
7. Tiefengeothermie

Zusammenstellung der Potentiale im Rahmen von Literaturrecherchen

Die geografisch gebundenen Energiequellen sind alle als georeferenzierte GIS Datensätze vorhanden.

Neben der geografischen Verteilung der Energiequellen ist deren Potential eine weitere wichtige Grösse für die spätere Zuordnung zu den Nah- und Fernwärmegebieten. Mit ihr wird verhindert, dass unrealistisch hohe Zuordnungen vorgenommen werden.

Nachfolgend werden die Potentiale der erwähnten Systeme besprochen. Sie wurden durch Literaturrecherchen zusammengestellt und bei Bedarf mit eigenen Abschätzungen ergänzt.

4.2 Geografisch gebundene erneuerbare Energiequellen

4.2.1 Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA)

Nebst der Klärung zum Potential ist die Frage zum erneuerbaren Anteil im Abfall zentral für unsere Untersuchung. In der Studie (9) von 1993 wurde der Siedlungsabfall von 32 Gemeinden hinsichtlich des Gehalts an erneuerbarer Energie untersucht. Die erneuerbaren Anteile bemessen am Heizwert setzten sich wie folgt zusammen:

- 29% von Papier und Karton
- 14% von Naturprodukten wie Holz
- 7% von kompostierbaren Abfällen

Neben Siedlungsabfällen werden auch andere Abfälle verbrannt. Weil von diesen Abfällen keine Daten vorlagen, wurde definiert, dass der Heizwert des gesamten Abfalls als 50% erneuerbar gelten soll.

50% der KVA-Abwärme gelten aufgrund der Abfallzusammensetzung als erneuerbar

Um das zukünftige Fernwärmepotential der KVA abschätzen zu können, sind Annahmen zur Entwicklung der Abfallmenge zentral. Am Beispiel der Abfallmengenentwicklung im Kanton Zürich ist ersichtlich, wie unterschiedlich sie sich je nach Szenario entwickeln könnte.

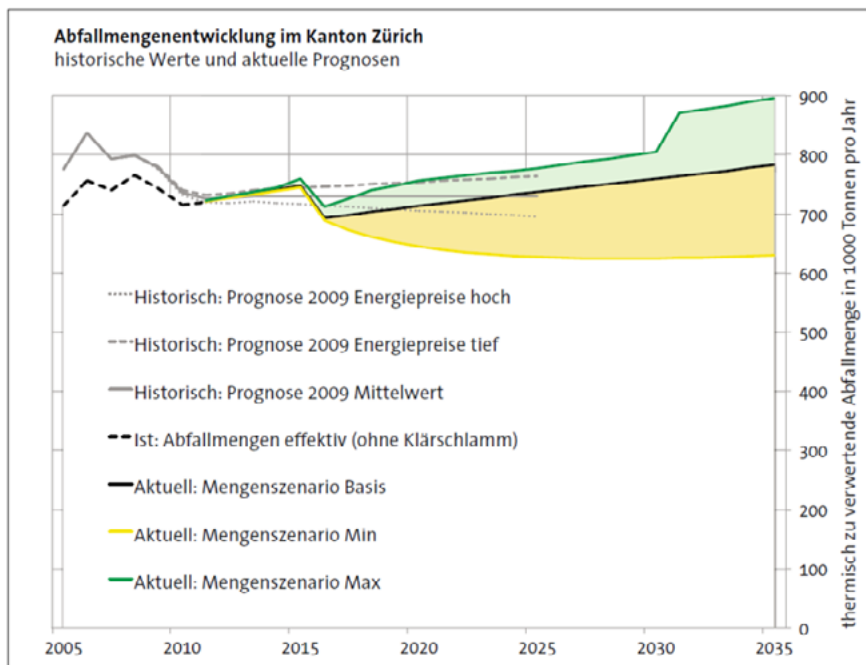


Bild 11: Abfallmengenentwicklung im Kanton Zürich (Quelle (10)).

Konstante Abfallmenge

Beeinflusst wird die Entwicklung durch die Bevölkerungszunahme, dem wirtschaftlichen Konjunkturverlauf (BIP) aber auch durch politische Massnahmen zur Abfallverwertung. Wenn zum Beispiel Kunststoff und/oder biogene Abfälle² (siehe Studie BAFU 2012) recycelt werden müssen, hat das einen entscheidenden Einfluss auf den Heizwert und die Menge des Abfalls und damit auch auf das Wärmepotential.

Für die vorliegende Arbeit gehen wir davon aus, dass die Abfallmenge konstant bleibt. Damit nehmen wir an, dass die Zunahme der Abfallmenge in Folge des Bevölkerungswachstums durch verbessertes Recycling kompensiert werden kann.

Jährlich werden in der Schweiz ca. 3.7 Mio. Tonnen Abfall verbrannt, was einer Wärmemenge von 11.9 TWh entspricht. Gemäss dem Basispapier zur Energie- und Ressourcenpolitik der Schweizer KVA (11) wurden im Jahr 2010 daraus 2.8 TWh Wärme oder Dampf und ca. 1.4 TWh Strom verkauft. Dies entsprach einer Netto-Energieeffizienz (R1³) von ca. 55%.

Technisch ist es möglich, die Energieeffizienz deutlich zu steigern. Das AWEL des Kantons Zürich hat eine Erhebung zum Stand der Technik gemacht, wonach für neue Anlagen die Netto-Energieeffizienz bei 65% lag. Die besten heutigen Anlagen erreichen sogar um 80%.

Gemäss (11) liessen sich durch eine Steigerung der Netto-Energieeffizienz von heute 55 auf 80% ohne zusätzlichen Brennstoffverbrauch rund 1.1 TWh Strom oder 2.9 TWh Wärme (oder eine Kombination davon) zusätzlich produzieren.

Das erneuerbare Wärmepotential der KVA's kann von 2.8 auf 5.7 TWh/Jahr gesteigert werden

Für das gesuchte Wärmepotential gehen wir von dieser möglichen Effizienzsteigerung aus, die wir zu Gunsten der Fernwärme annehmen. Dadurch würden 2.8 TWh mehr Wärme zur Verfügung stehen, was zu einem totalen Wärmepotential von 5.7 TWh/a führt. Zusammengefasst lauten die Zahlen:

| | |
|-------------------------------------|------------------|
| Abfallmenge Schweiz 2010 | 3.7 Mio to |
| Wärmeinhalt Abfall | 12.0 TWh/a |
| Wärmepotential KVA 2010 | 2.8 TWh/a |
| Wärmepotential KVA zukünftig | 5.7 TWh/a |

² In der neuesten Erhebung des BAFU der Kehrrichtzusammensetzung im Jahr 2012 wird gezeigt, dass rund 32% des Kehrrechts aus biogenen Abfällen besteht. Zur Hälfte bestehen diese biogene Abfälle aus grösstenteils noch geniessbaren Nahrungsmitteln.

³ Die Netto Energieeffizienz ist definiert als Verhältnis der in der Anlage netto produzierten Energie (Wärme und Strom) zur gesamten für die Dampfproduktion nutzbaren Energie, korrigiert um Schlacken- und Abstrahlungsverluste. Ausführliche Beschreibung siehe (37).

4.2.2 Abwärme Industrie

Bei Produktionsprozessen der Industrie kann Abwärme auf verschiedenen Temperaturniveaus anfallen. Geht man davon aus, dass der Prozess wärmetechnisch optimiert ist, kann man jene Abwärme, welche ohne zusätzlichen Primärenergieeinsatz anfällt, als erneuerbar betrachten.

Abwärmennutzung in der Industrie ist individuell und kritisch zu prüfen

Folgende Parameter sind jedoch entscheidend, ob die Abwärme sinnvoll genutzt werden können:

- Das Temperaturniveau der Abwärme entscheidet, wie diese sinnvollerweise verwendet werden kann. Die Temperatur-Bandbreite reicht von der Eignung zur Stromerzeugung mit ORC⁴ (Temperatur Abwärme >150°C) bis hin zur Nutzung als Wärmequelle von Wärmepumpen (Temperatur Abwärme < 30°C).
- Die zeitliche Verfügbarkeit im Tagesverlauf und der verlässliche Anfall im Wochen- und Jahresverlauf sind entscheidend für einen wirtschaftlichen Betrieb.
- Meist kommen in der Industrie bei Rentabilitätsrechnungen Betrachtungszeiten von nur fünf Jahren zum Einsatz. Im Weiteren sind nicht produktionsbedingte Eingriffe in die Prozesse meist nicht willkommen und Garantien für längerfristige Abwärmelieferungen können oft nicht abgegeben werden.

Die aufgeführten Punkte zeigen, dass die Abwärmennutzung in der Industrie meist individuell und kritisch zu prüfen ist.

Der Kanton Wallis hat eine Erhebung der Abwärmequellen auf dem Kantonsgebiet durchgeführt. Es wurden dabei von rund 200 Industriebetriebe Daten erhoben und in das Kantons-GIS integriert (Bild 12).

Als Ergebnis kam eine totale Abwärmemenge von rund 2'000 GWh/a zusammen. Davon sind ca. 1'500 GWh/a noch ungenutzt. Die Aufteilung der Abwärmemengen in verschiedene Nutzungsmöglichkeiten resp. Temperaturniveaus zeigt Tabelle 3.

| Mögliche Nutzung | min. Temperaturniveau Abwärme | Potential |
|---|-------------------------------|---------------|
| Stromproduktion OCR | 150°C | 16.5 GWh/a |
| Kälteproduktion mit Absorbertechnologie | 100°C | 3.8 GWh/a |
| Fernwärme | 85°C | 604.3 GWh/a |
| Heizen/Warmwasser | 60 / 65°C | 16.3 GWh/a |
| Kalte Fernwärme | 10°C | 940.3 GWh/a |
| Total | | 1'581.2 GWh/a |

Tabelle 3: Abwärmepotential Wallis (Quelle: (12))

⁴ Organic Rankine Cycle: Betrieb von Dampfturbinen mit einem anderen Arbeitsmittel als Wasserdampf. Kommt vor allem zur Stromerzeugung bei tiefen Temperaturgefällen zum Einsatz.

Der Kanton Waadt wird ein ähnliches Projekt durchführen. In der restlichen Schweiz sind solche systematische Untersuchungen zurzeit nicht bekannt.

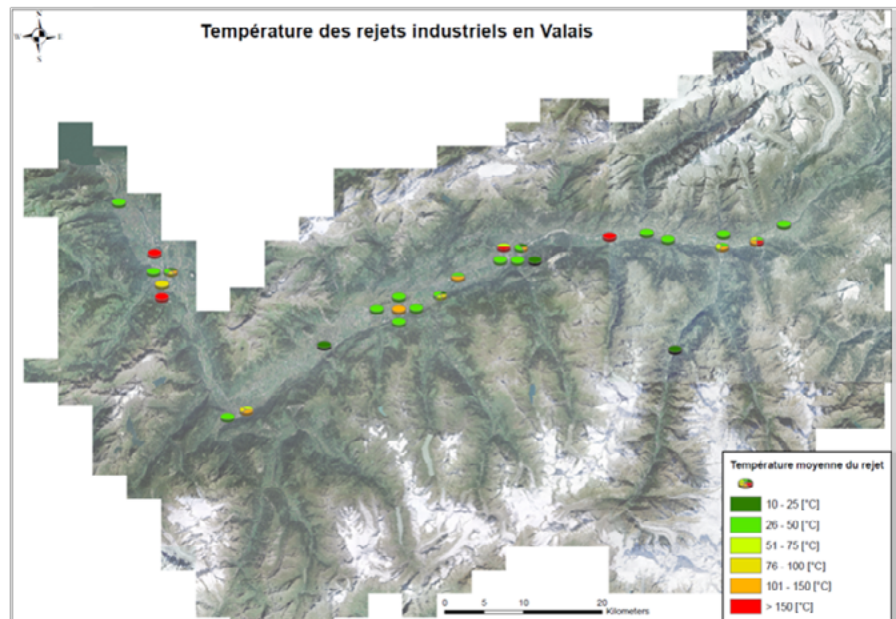


Bild 12: Temperaturniveaus der Abwärmequellen im Kanton Wallis (Quelle: CREM).

Nicht nur in der Schweiz auch international sind wenige Studien vorhanden. Die detaillierteste Studie ist jene des norwegischen Energieversorgers Enova aus dem Jahr 2009. Das Institut für Energie- und Umweltforschung ifeu in Heidelberg versuchte aufgrund dieser und zwei anderer Studien Aussagen über das Abwärmepotential in Deutschland zu machen. Den Anfall an Abwärme haben sie als prozentualen Anteil am Endenergieverbrauch in verschiedenen Branchen dargestellt (Tabelle 4).

| Branche | Anteil AW >140°C | Anteil AW 60-140°C | Total AW >60°C |
|------------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Nahrungsmittel | - | - | - |
| Textil / Leder | - | - | - |
| Papier Druck | - | - | - |
| Papier Herstellung | - | - | - |
| Chemie / Pharma | 5% | 2.5% | 7.5% |
| Zement / Beton | 40% | 20% | 60% |
| Andere nichteisen Mineralien | 40% | 20% | 60% |
| Metall / Eisen | 30% | 15% | 45% |
| Nicht Eisen-Metall | 30% | 15% | 45% |
| Metall Geräte | 3% | 1.5% | 4.5% |
| Maschinen | 3% | 1.5% | 4.5% |
| Andere Industrien | 1% | 0.5% | 1.5% |
| Bau | - | - | - |

Tabelle 4: Abwärme in Prozent des Endenergieverbrauchs in Deutschland (Quelle:(13)).

Um für die Schweiz trotz fehlender Datengrundlage eine grobe Abschätzung des gesamten Abwärmepotentials zu machen, wurden die Abwärmeanteile gemäss der Tabelle 4 auf die Schweiz übertragen.

Nur Grobschätzung aufgrund fehlener Daten möglich

Der Endenergiebedarf Wärme und Strom der Schweizer Industrie betrug 2010 gemäss (14) rund 47.5 TWh. Davon wurden ca. 54% für Prozesswärme eingesetzt, was 25 TWh entspricht. Daraus ergibt sich eine potentielle Abwärmemenge mit $T_{Abwärme} > 60^{\circ}\text{C}$ von **rund 3.6 TWh/a** (Vergleich Wallis: 640 GWh/a).

25

Ein wesentlich grösserer Anteil Abwärme dürfte mit Temperaturen zwischen 20°C und 60°C zur Verfügung stehen. Konkrete Angaben können im Moment nicht gemacht werden, da für die Schweiz keine systematischen Untersuchungen zum Thema industrieller Abwärme vorliegen.

Die geschätzte Abwärmemenge ist mit grosser Vorsicht zu geniessen. Zumal die Grundlagen aus verschiedenen internationalen Studien zusammengestellt und nicht auf Schweizer Verhältnisse abgestimmt wurde. Fraglich ist z. B. auch, ob in der Nahrungsmittelbranche wirklich keine Nennenswerte Abwärme anfällt. Es gibt Schweizer Firmen aus dieser Branche, welche nach unserem Wissen Abwärme für Nahwärmeverbände abgeben können.

Gesamtschweizerische Erhebung der Abwärme-mengen und deren Lage ist anzustreben

Neben der Schwierigkeit die Abwärmemenge in der Schweiz zu bestimmen gibt es auch das Problem die Abwärmequellen zu lokalisieren. Dafür müsste eine gesamtschweizerische Erhebung ähnlich wie im Wallis durchgeführt und in einem „Abwärme-“GIS abgebildet werden.

Wie sinnvoll eine solche Untersuchung wäre, zeigt unserer Meinung nach das Beispiel Richtplan Energie Lyss (siehe (15)). Die Abwärme der GZM AG hat eine Temperatur von 100°C und reicht theoretisch um die Hälfte des Heizwärmebedarfs der Stadt Lyss zu decken. Erst im Rahmen der systematischen Erfassung von Abwärme für die Arbeiten am Richtplan wurde das Potential erkannt.

Georeferenzierte Zuordnung der industriellen Abwärme heute nicht möglich

Wie oben dargelegt war es im Rahmen dieser Studie vom Umfang her nicht möglich, eine vernünftige georeferenzierte Darstellung und Quantifizierung der Abwärmequellen zu erstellen. Damit konnte auch keine Zuordnung in Kapitel 5 erfolgen.

4.2.3 Abwasserreinigungsanlagen (ARA)

Mit dem Abwasser aus Haushalten, Büros sowie aus Industrie und Gewerbe gehen stetig enorme Mengen an Wärme in die Kanalisation ungenutzt verloren und belasten die natürlichen Gewässer. Diese Abwärme kann jedoch mittels Wärmetauschern zurückgewonnen und für Heizzwecke verwendet werden.

Wärmeentzug aus geklärten Abwasser

Grundsätzlich kann dem Abwasser vor (ungereinigt) oder nach (gereinigt) der ARA Wärme entzogen werden. Wir betrachten in dieser Studie die Abwärmenutzung aus dem geklärten Abwasser nach der ARA (Bild 13). Der Wärmeentzug ist dort unproblematisch, da der Klärprozess nicht beeinträchtigt wird und, für grosse Heizanlagen vorteilhaft, die grösste Wassermenge in Kanalnetzen anfällt.

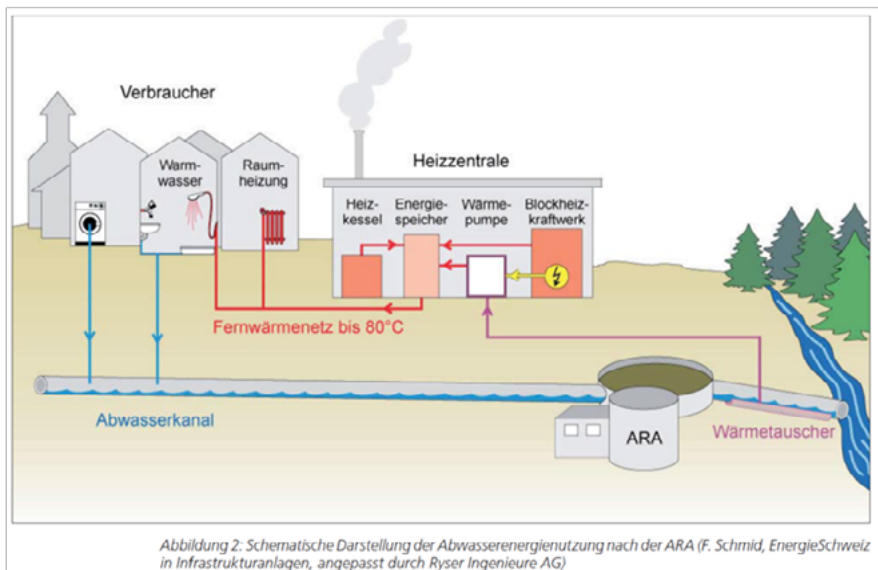


Bild 13: Prinzip Abwasserwärmenutzung von gereinigtem Abwasser (16).

Das Potential hat die zukünftige Entwicklung der Abwassermenge zu berücksichtigen. Aussagen dazu sind im Bericht Abwasserentsorgung 2025 in der Schweiz von der EAWAG (17) zu finden.

Entwicklung der Abwassermengen ist relevant

Die Aufteilung der Abwasserquellen ist wie folgt:

- 15% Regenwasser
- 40% Fremdwasser⁵
- 45% Haushalt und Industrie

Der Anteil von Haushalt und Industrie erfährt durch das Bevölkerungswachstum eine Zunahme. Man geht bei einer Bevölkerungszahl von 9 Mio. von einer Zunahme um 15% gegenüber heute aus.

Demgegenüber stehen Einsparungen im Haushalt und Industrie dank neuen Technologien und Geräten mit geringem Wasserverbrauch, die aber in Zukunft eher als klein eingeschätzt werden.

Weitere Einsparungen sind im Fremdwasser zu erwarten, da auf Bundesebene die gesetzliche Verpflichtung besteht, das Fremdwasser zu reduzieren. Aber auch da werden die Einsparungen als gering erachtet.

Aus diesen Aussagen ist kein klarer Trend in der Entwicklung der Abwassermenge zu finden. Deshalb gehen wir in dieser Arbeit davon aus, dass sie gleich bleibt. Die Grundlage für unsere Wärmepotentialabschätzung bilden die Abwassermengen aus der Statistik (18) von 2007. Zur Bestimmung des Wärmepotentials berücksichtigen wir ARAs der Grössenklasse 1 bis 3. Das sind grössere ARAs ab 10'000 Einwohnergleichwerte⁶ (EGW). Total sind es 296 Anlagen, deren Verteilung in Bild 14 dargestellt ist.

Annahme konstante Abwassermenge

⁶ Der Einwohnergleichwert dient als Referenzwert der Schmutzfracht in der Wasserwirtschaft



Bild 14 Verteilung der ARA mit mehr als 10'000 EGW in der Schweiz. Die Grösse der Symbole ist proportional zu den EGW.

Zur Bestimmung der Abwärmemengen wurde zuerst für jede ARA ein mittlerer Tagesabflussvolumenstrom bestimmt. Um auf der sicheren Seite zu sein, wurde dieser aus gemessenen Tagesabflüssen in der trockenen Jahresperiode vom Oktober bis Juni gebildet.

Das Jahresmittel der Abwassertemperatur aller ARA's beträgt 13.5 °C. Für den Winter gehen wir davon aus, dass diese rund zwei Kelvin tiefer, also bei 11.5°C liegt. Bei einer maximalen Wärmenutzung mit Wärmepumpen wird das Abwasser um 6.5 Kelvin auf 5°C abgekühlt.

Der mittlere Tagesabfluss aller ARA's auf ein Jahr hochgerechnet und um 6.5 Kelvin abgekühlt, ergibt das theoretische Wärmepotential, welches Wärmepumpenanlagen mit einem COP von 4.5 erzeugen können (siehe Bild 15). Dieses ARA-Wärmepumpen-Potential liegt gemäss unseren Abschätzungen bei rund 13.9 TWh/a.

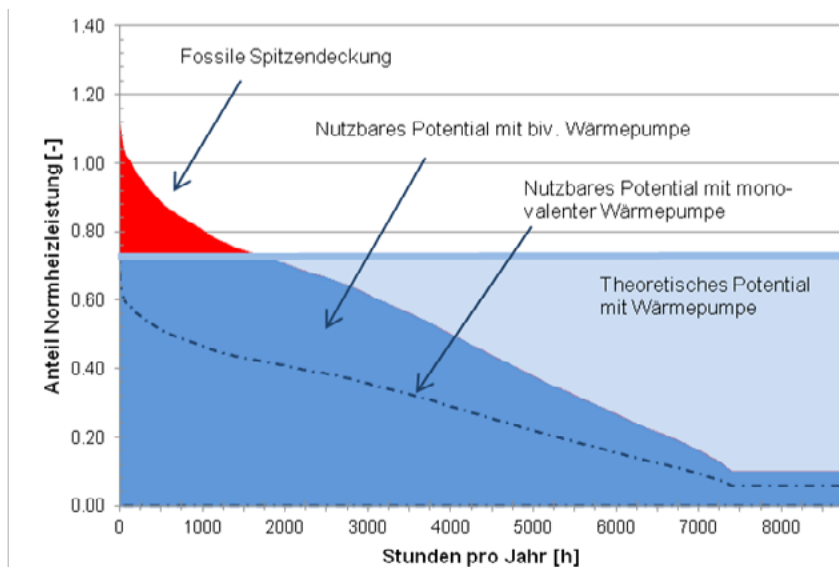


Bild 15 Theoretisches und nutzbare Wärmepotential.

Für unsere Potentialberechnung gehen wir von einer bivalenten Wärmeerzeugung aus. Bivalent bedeutet, dass die Wärmepumpe nicht die ganze, jeweils geforderte Heizleistung erbringt. In besonders kalten Tagen wird die Wärmepumpe mit einer fossilen Spitzendeckung ergänzt (Bild 15, roter Bereich). Die Anlagen sind so ausgelegt, dass der fossile Anteil rund 10% und jene der Wärmepumpe rund 90% der Energieproduktion abdeckt.

**Bivalente Wärmepumpen-
anlagen für wirtschaft-lichen
Betrieb**

Die Spitzendeckung erlaubt auch höhere Vorlauftemperaturen für das Heizwasser als es mit Wärmepumpen wirtschaftlich möglich wäre. Weil die Wärmepumpe auch nur einen Teil der Heizleistung erbringen muss, kann sie kleiner ausgelegt werden als im monovalenten Fall. Das führt wiederum zu niedrigeren Investitionskosten.

Bei einer vollständigen Nutzung des theoretischen Potential's der ARA's mit bivalenten Anlagen, könnte eine Wärmemenge von **rund 7.7 TWh⁷** pro Jahr genutzt werden.

4.2.4 Grundwasser

Grundwasser ist eine ideale Energiequelle, wenn nicht nur geheizt, sondern auch gekühlt werden muss. Die Temperatur liegt das ganze Jahr im Bereich von 10°C und ist damit dem Oberflächenwasser und der Aus-senluft in Kälteperioden überlegen (siehe Bild 16). Für die Nutzung von Grundwasser sind eine grosse Mächtigkeit⁸ der Grundwasserleiter und eine hohe Durchlässigkeit des Bodens gute Voraussetzungen.

**Keine schweizweite
Potentialstudie bekannt**

⁷ In diesem Potential von 7.7 TWh/a wurde das Wärmebedarfsprofil von Heizen und Warmwasser berücksichtigt. Das heisst, im Sommer kann weniger Wärme genutzt werden als im Winter. Damit ist die Bandlast grösser.

⁸ Dicke der Wasserführenden Schicht.

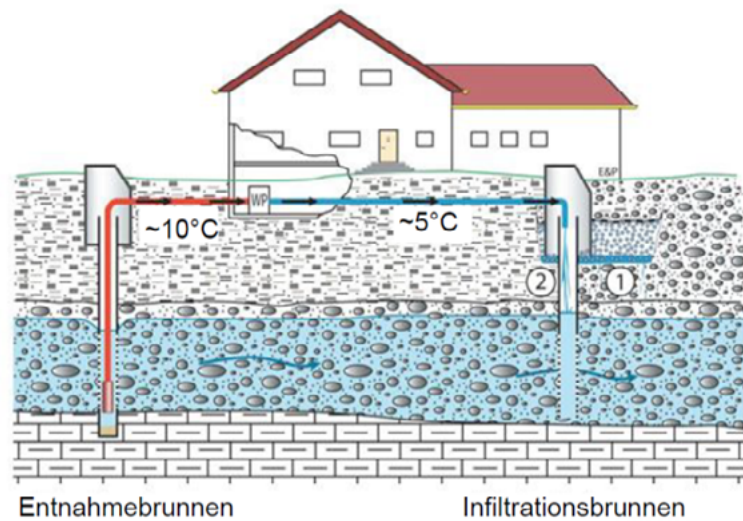


Bild 16: Prinzipschema einer Grundwassernutzung (Quelle: Eberhard und Partner AG).

Auch bei ausreichendem Grundwasservorkommen gibt es Einschränkungen zu beachten. Zum Beispiel bildet das abgekühlte Wasser, das ins Grundwasser zurückgegeben wird und sich mit dem Grundwasserfluss ausbreitet, Kältefahnen. Diese können benachbarte Nutzungen beeinflussen und das Potential reduzieren (Bild 17).

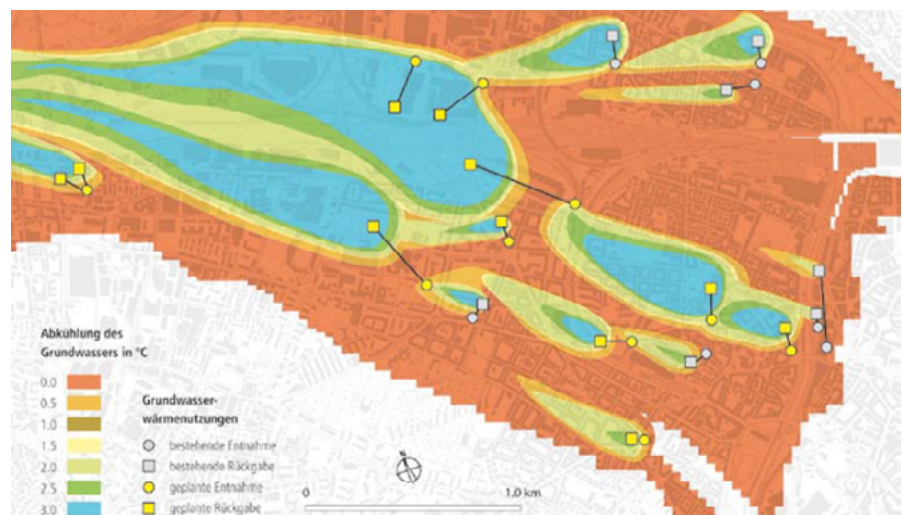


Bild 17 Kältefahnen im Limmat Grundwasserstrom (Quelle: (20)).

Weitere Einschränkungen ergeben sich, wenn Altlasten im Boden sind oder Schutz-zonen die Nutzung ganz verbieten. Ebenso kann die Wasserqualität eine Nutzung erschweren oder verunmöglichen.

Für Grundwasser sind uns keine gesamtschweizerischen Studien über das verfügbare Wärmepotential bekannt. Lokale Potentialanalysen bestehen hingegen, wie z.B. über das Grundwasser-Wärmepotential im Talboden von Ebnet-Kappel und Wattwil (19).

Für unsere Potentialabschätzung betrachten wir nur Grundwassergebiete ab einer Mächtigkeit von 10 Metern. Damit ist das Gebiet für Grundwassernutzung bestimmt. Sie nimmt eine Fläche von rund 1'233 km² ein, was etwa 3% der Fläche der Schweiz entspricht.



Bild 18: Lage der Grundwassergebiete mit Mächtigkeit von 10 und mehr Metern.

Aus der Studie von Ebnet-Kappel lässt sich ein spezifisches Wärmepotential von rund 2.7 bis 8.0 W/m² auf dem Grundwassergebiet ableiten (entspricht 5.3 bis 16.0 kWh/m²a). Die Wärmeentzugsleistung wurde dort in Analogie von Erdwärmekörpern berechnet. Eine andere Methode geht von der Ergiebigkeit des Grundwassers und der Ausbreitung der Kältefahnen aus. Man ordnet in einem regelmässigen Muster fiktive Entnahme- und Infiltrationsbrunnen an, wie in Bild 19 dargestellt.

Modellrechnungen in Analogie zu Erdwärme-körpern oder von Kälte-fahnen

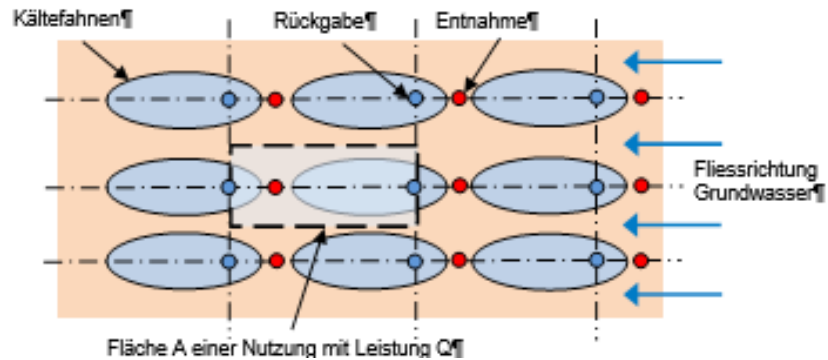


Bild 19: Anordnung zur Bestimmung der theoretischen, spezifischen Entzugsleistung.

Alle haben dieselbe Wasserentnahmekapazität und die Abstände sind so gelegt, dass sie sich nicht beeinflussen (Berechnung z.B. mit dem Verfahren nach Ingerle 1988). Damit lässt sich die spezifische Entnahmekapazität abschätzen, die je nach verwendeten Parametern im Bereich von 0.5 bis 28 W/m² liegen.

Untersuchungen in der Gemeinde Bern mit einer ähnlichen Methode und realen Parametern von Kellerhals und Haefeli ergaben Werte von 0.8 bis 2.1 W/m², an speziellen Orten bis zu 13 W/m².

Vorsichtige Schätzung von mittlerer Entnahmeleistung

Die Bandbreiten des spezifischen Wärmepotentials sind gross und aufgrund fehlender Daten nicht ohne grossen Aufwand auf den Grundwassergebieten lokal zu spezifizieren. Daher beschränken wir uns darauf, einen pauschalen Grenzwert für das spezifische Umweltwärmepotential bei 1.5 W/m² zu definieren, der überall auf den von uns betrachteten Grundwasserflächen gilt und den Wärmeentzug limitiert. Das Grundwasser steht das ganze Jahr als Wärmequelle zur Verfügung. Daher bildet es eine Bandleistung, die gesamtschweizerisch bei rund 1'800 MW liegt. Analog der Abwärmenutzung von ARAs setzen wir bivalenten Wärmepumpenanlagen für die Nutzung voraus mit demselben Parameter für die Auslegung. Damit erhalten wir ein **Wärmepotential von 12 TWh/a**.

4.2.5 Seen

Grundlage für unsere Potentialabschätzung zum Umweltwärmepotential der Seen ist die Studie „Potential zur Wärmeenergienutzung aus dem Zürichsee“, die von Professor Wuest der EAWAG für die Stadt Zürich durchgeführt wurde (21). Nach ihm müsste eigentlich jeder See einzeln mit Berücksichtigung seiner Besonderheit betrachtet werden. Die Methode im erwähnten Bericht lässt sich aber für eine erste Potentialschätzung auf andere Seen übertragen.

Der Wärmehaushalt eines grossen Sees lässt sich gut anhand der Temperaturverteilung über die Jahreszeiten illustrieren. In Bild 20 ist exemplarisch die vertikale Temperaturverteilung des Vierwaldstätter-sees im Verlauf eines Jahres dargestellt. Die obere Schicht erwärmt sich im Frühling und Sommer und kühlt im Herbst und Winter wieder ab. Der Wärmeaustausch erfolgt dabei hauptsächlich über die Seeoberfläche. Die Wärmebilanz lautet:

$$Q_{tot} = Q_{Str\ in} - Q_{Str\ aus} - Q_{Verd} - Q_{Konv} - Q_{geoth} \quad [1]$$

Die einzelnen Terme sind:

- Q_{tot} = Wärmeaustausrate [W/m^2]
- $Q_{Str\ in}$ = Vom Wasser absorbierte Strahlung [W/m^2]
- $Q_{Str\ aus}$ = Vom Wasser abgestrahlte langwellige Strahlung [W/m^2]
- Q_{Verd} = Verlust durch Verdunstung, evt. Gewinn durch Taubildung
- Q_{Konv} = Verlust durch Konvektion
- Q_{geoth} = Wärmefluss über den Seegrund

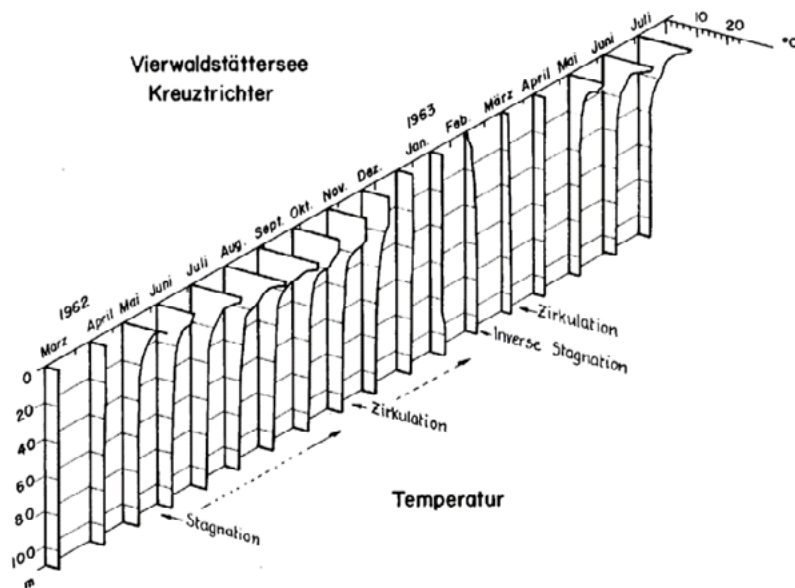


Bild 20: Die vertikale Temperaturverteilung im Vierwaldstättersee im Wandel der Jahreszeiten (Prof. H. Ambühl EAWAG)

Neben dem Wärmefluss an der Oberfläche ist der Wasserzufluss (Q_{Konv}) der zweitgrösste Einflussfaktor auf den Wärmehaushalt. Vor allem in Alpenrandseen, welche im Frühling grosse Mengen von kaltem Schmelzwasser empfangen, beeinflusst er spürbar den Wärmehaushalt. Beim Zürichsee hingegen ist der Einfluss des Zuflusses gegenüber dem Wärmeaustausch an der Oberfläche sehr klein.

Wärmehaushalt primär über die Oberfläche

Der mittlere Wärmefluss an der Oberfläche in der warmen (positiv) und der kalten (negativ) Jahreszeit sind vom Betrag etwa gleich gross und beträgt beim Zürichsee rund 70 W/m^2 . Bei einer Oberfläche von 89 km^2 ergibt dies eine mittlere Leistung von beachtlichen $6'230 \text{ MW}$.

Mit Wärmepumpen kann ein Teil dieser Wärmeströme genutzt werden. Solche Anlagen entnehmen dem See Wasser und geben es abgekühlt wieder zurück. Welche Bedingungen einzuhalten sind, insbesondere die Rückgabetemperatur, ist in der Gewässerschutzordnung auf Bundesebene geregelt. Dort steht, dass durch Wärmeentzug im Gewässer die natürlichen Temperaturverhältnisse, die Nährstoffverteilung sowie, insbesondere im Uferbereich, die Lebens- und Fortpflanzungsbedingungen für die Organismen nicht nachteilig verändert werden dürfen. Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen kommt die EAWAG Studie zum Schluss, dass die Wärmeentnahme unkritisch ist, sofern das Seevolumen nicht massiv abgekühlt wird. Massiv bedeutet, dass sich das ganze Seevolumen um mehr als ein Kelvin in der Heizsaison abkühlt.

Wärmeentnahme von 0.5 K gilt als unproblematisch

In der Empfehlung wird daher eine kleinere maximale Abkühlung von 0.5°C für das ganze Seevolumen angegeben. Diese Abkühlung, angewendet auf die kalte Jahreszeit ohne Berücksichtigung der Wärmeflüsse an der Oberfläche etc., ergibt für den Zürichsee eine maximal mögliche Nutzung von Wärmeenergie von $2'200 \text{ GWh}$ pro Saison (bei 3.9 km^3 Volumen). Diese Abschätzung wurde auch bei den anderen Seen in gleicher Weise angewandt (Seevolumen stammen aus (22) und (23)).

Speziell behandelt wurden jene Seen, die an der Grenze und nur teilweise in der Schweiz liegen. Das sind der Lac Lemman, Bodensee, Lago Maggiore und der Lago di Lugano. Bei ihnen wurde das Potential proportional des Oberflächenanteils der zur Schweiz gehört angepasst. Von allen Seen wurden jene berücksichtigt, die folgende Kriterien erfüllten:

1. Die Höhenlage darf nicht höher als $1'000 \text{ m.ü.M.}$ betragen. Damit werden vor allem Stauseen im Gebirge ausgeklammert.
2. Das Potential der Umweltwärme ist grösser als 50 GWh/a . Damit werden kleine und kleinste Seen ausgeklammert.

In der folgenden Abbildung sind die Seen, die die Anforderungen erfüllen rot eingezeichnet.

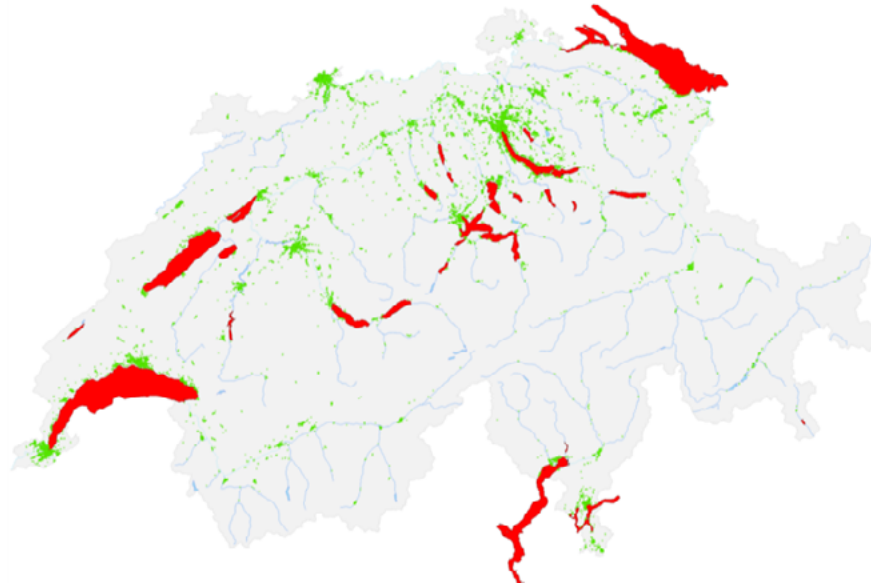


Bild 21: Die für das Wärmepotential berücksichtigten Seen sind rot eingefärbt. Grün sind die ermittelten Nah- und Fernwärmegebiete.

Die festgelegte Umweltwärme wird wiederum mit bivalenten Wärme-pumpenanlagen genutzt. Das **Wärmepotential ergibt sich damit zu beachtlichen 97 TWh/a**. Eine Aufteilung auf die einzelnen, berücksichtigten Seen zeigt nachfolgendes Diagramm in Bild 22.

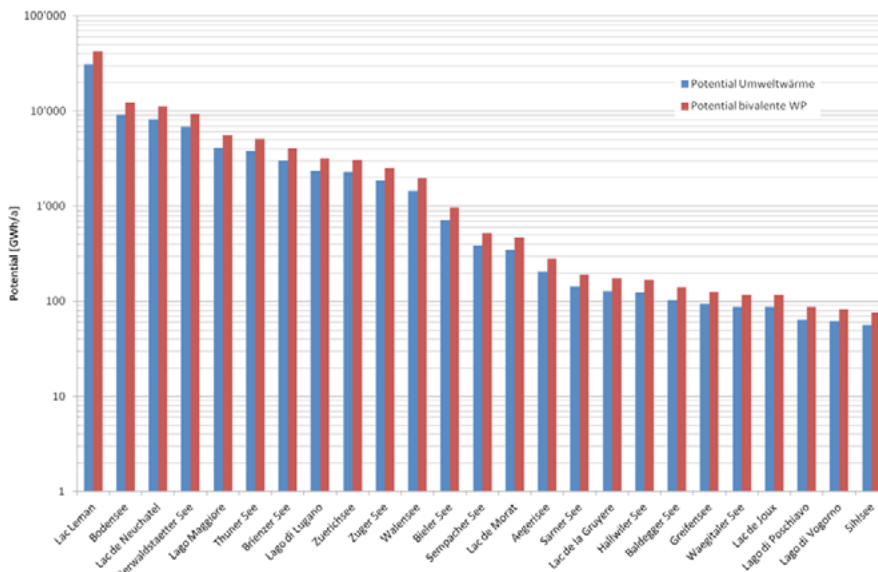


Bild 22: Potential der ausgewählten Seen. Die Potentiale der grenzüberschreitenden Seen wurden gemäss dem Oberflächenanteil der Schweiz am gesamten See angepasst.

4.2.6 Flüsse

Der Wärmehaushalt von Flüssen ist komplexer als jener der Seen. Grundsätzlich gilt abschnittsweise dieselbe Wärmebilanz wie in Gleichung [1]. Laut der Studie von Reintartz (24) finden 82% des Energieaustausches an der Oberfläche, 15% zwischen Wasser und Gewässerbett und die restlichen 3% durch andere Prozesse statt (Bild 23).

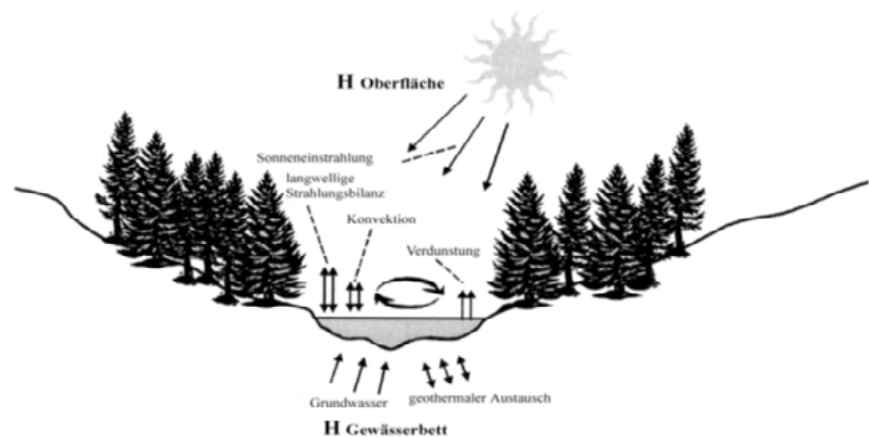


Bild 23 Wärmeaustauschprozesse am Fließgewässer (Quelle:(24)).

Komplexer Temperaturhaushalt und externe Einflussfaktoren

Mit diesem kontinuierlichen Energieaustausch verändert sich die Temperatur des Wassers entlang eines Flusses. Während in Quellgebieten die Wassertemperatur das ganze Jahr nahe jenem des Grundwassers entspricht, nimmt sie mit zunehmender Entfernung immer mehr jene der lokalen, mittleren täglichen Lufttemperatur an. Dies hängt vor allem mit der Zunahme der Wasseroberfläche und dem damit verbundenen grösseren Energieaustausch mit der Atmosphäre zusammen.

Als Beispiel ist in Bild 24 der Temperaturverlauf entlang des Mains vom 22. Juli 2006 aufgezeigt. Man sieht, dass die Temperatur nicht linear ansteigt und auch Sprünge aufweist. Diese Sprünge können menschliche Ursachen wie die Erwärmung durch thermische Kraftwerke, aber auch natürliche, wie der Zufluss eines Nebengewässers haben.

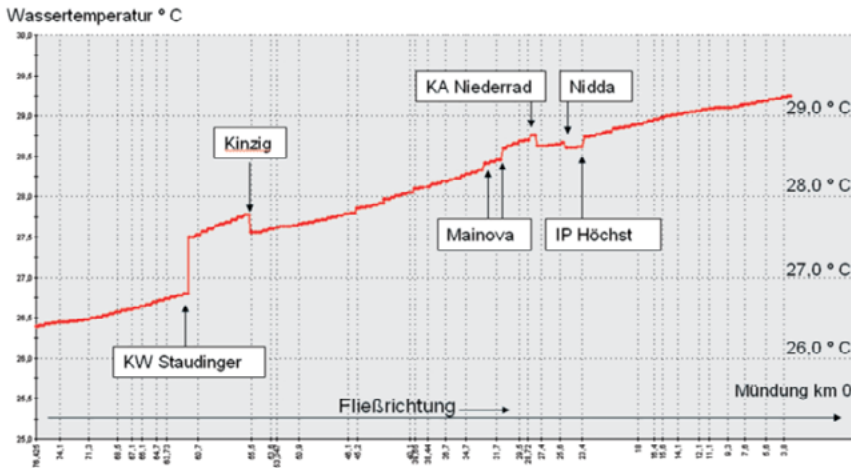


Bild 24 Temperaturverlauf des Main vom 22. Juli 2006 (Quelle (25)).

Was die menschlichen Einflüsse betrifft, sind sie durch gesetzliche Rahmenbedingungen für die Nutzung von Fließgewässern im eidgenössischen Gewässerschutzgesetz (26) geregelt. Dort wird vorgegeben, dass die Temperatur eines Fließgewässers durch Wärmeentzug gegenüber dem möglichst unbeeinflussten Zustand um höchstens 3°C, in Gewässerabschnitten von Forellenregionen um höchstens 1.5°C, verändert werden darf. Dabei darf die Wassertemperatur 25°C nicht übersteigen. Diese Anforderungen gelten nach weitgehender Durchmischung.

Um eine Potentialabschätzung machen zu können, müssen wir zunächst die Wärmeleistung eines Flusses bestimmen. Mit dem Abfluss \dot{V} wird die mögliche Wärmeentzugsleistung an einem beliebigen Punkt des Flusses nach folgender Beziehung berechnet:

$$\dot{Q} = \dot{V} \rho c \Delta T \quad [2]$$

Wobei ρ die Dichte und c die Wärmekapazität von Wasser und ΔT die Abkühlung durch die Wärmepumpe ist. Die Abflussmengen \dot{V} werden an Hydrostationen entlang der Flüsse gemessen. Die Daten werden beim Bundesamt für Umwelt (27) publiziert. Für die vorliegende Arbeit wurden die Minimalabflüsse im Winter gewählt, die den möglichen Wärmeentzug limitieren und damit bestimmend für das Potential sind.

Für die Abkühlung ΔT haben wir 1 Kelvin gewählt. Damit halten wir einerseits die gesetzlichen Vorgaben inkl. Forellenregionen ein, andererseits sind wir noch nicht in einem Bereich, der als deutliche Beeinflussung bezeichnet werden kann. Gemäss EAWAG (21) wäre dies ab 1.6 Kelvin der Fall. Ein weiterer Punkt sind die tiefen Wassertemperaturen, die sich im Winter einstellen können. Als Beispiel ist in Bild 25 der Verlauf der Tagesmitteltemperatur der Aare dargestellt. Die tiefste Temperatur wurde 1971 mit 1.8°C gemessen. Mit der gewählten Abkühlung wäre der Leistungsentzug noch möglich.

Abkühlung um 1 Kelvin

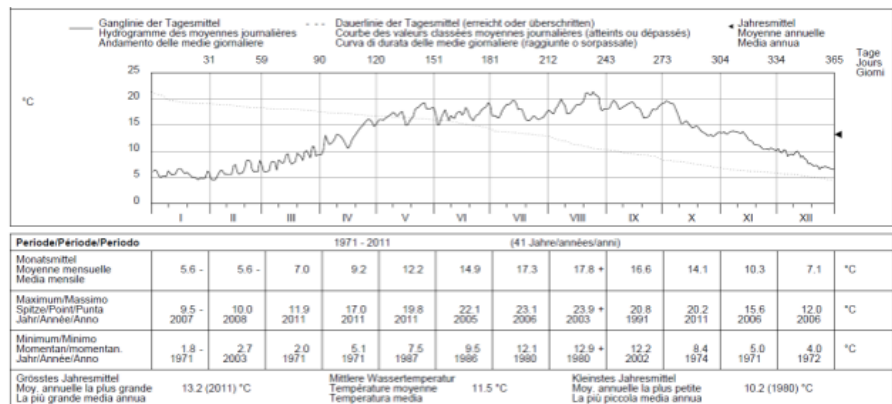


Bild 25: Jahresverlauf der Tagesmitteltemperatur der Aare bei Hagneck (aus (27)).

In vorliegender Arbeit haben wir uns auf die grossen Flüsse mit einem minimalen Abfluss von 10 m³/s beschränkt (Bild 26). Damit werden vor allem die dichtbesiedelten Gebiete erfasst und die Flüsse können mehrere Nah- und Fernwärmegebiete mit grösserem Wärmebedarf versorgen.

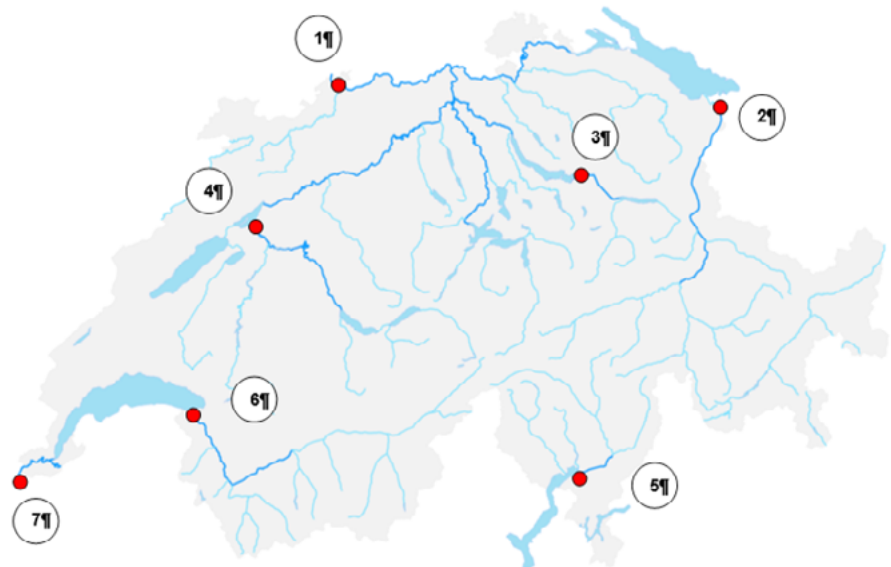


Bild 26: Dunkelblau sind die Flüsse mit mehr als 10 m³/s min. Abfluss eingezeichnet. Die roten Punkte markieren die Bilanzpunkte der Tabelle 5.

Das Potential der Fliessgewässer wurde mit den folgenden Annahmen geschätzt:

1. Die Gewässer werden von der Quelle bis zum Verlassen der Schweiz um 1 Kelvin abgekühlt.
2. Punkt 1 gilt nicht für jene Flüsse, welche in einen See münden. Dort wird angenommen, dass eine Regeneration stattfindet und der Fluss ab dem Verlassen des Sees wieder um ganze 1 Kelvin abgekühlt werden kann bis er die Schweiz verlässt.

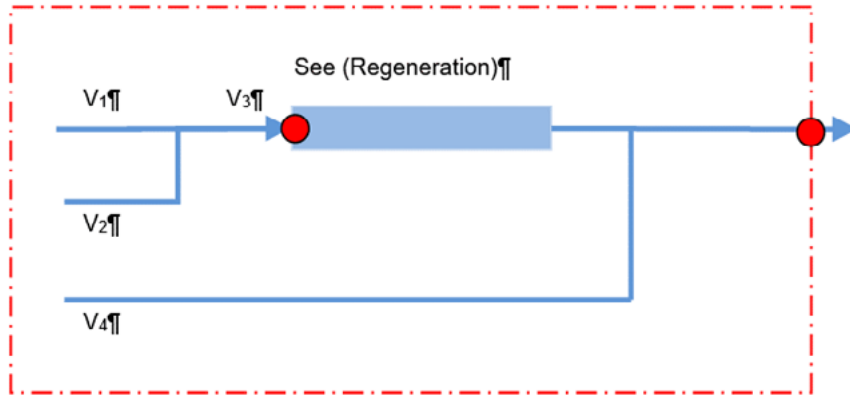


Bild 27 Prinzip der Potentialschätzung der Fließgewässer in der Schweiz.

Die Annahme 1 kommt daher, dass der grösste Teil des Wärmeaustausches über die Oberfläche erfolgt und im Winter nicht mit einer Regeneration im normalen Flussverlauf gerechnet werden kann. Regenerierung durch humane Einflüsse vor allem durch die AKW's Mühleberg (600 MW Abwärme) und Leibstadt (1'200 MW Abwärme) werden vernachlässigt.

Die zweite Annahme ist durch das grosse Wärmepotential der Seen begründet. Die Abkühlung der Flüsse wird sich dort auf Kosten der gespeicherten Wärme regenerieren.

Das Wärmepotential wurde wiederum mit der Annahme berechnet, dass bivalente Wärmepumpenanlagen eingesetzt werden. Damit erhalten wir ein Wärmepotential von 23.1 TWh/a.

| Nr | Fluss | Messstation | Mittlerer Abfluss [m3/s] | Minimaler Abfluss [m3/s] | Leistung [MW] | Wärmepotential [GWh/a] |
|----|----------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|---------------|------------------------|
| 1 | Rhein | Rheinfelden | 1'154 | 569 | 2'380 | 15'700 |
| 2 | Rhein | Diepoldsau | 274 | 88 | 370 | 2'400 |
| 3 | Limmat | Linth-Weesen, Biäsche | 59 | 21 | 90 | 600 |
| 4 | Aare | Hagneck | 180 | 46 | 190 | 1'300 |
| 5 | Ticino | Bellinzona | 65 | 21 | 90 | 600 |
| 6 | Le Rhône | Branson | 145 | 41 | 170 | 1'100 |
| 7 | La Rhône | Chancy, Aux Ripes | 349 | 73 | 300 | 2'000 |
| | | Total | | | 3'590 | 23'700 |

Tabelle 5: Abflussdaten, Leistung und Wärmepotential an den Bilanzpunkten.

4.3 Geografisch nicht gebundene erneuerbare Energiequellen

In vorliegender Potentialanalyse gehen wir davon aus, dass jene Cluster, welche keinen wirtschaftlich interessanten Zugang zu geeigneten, geografisch gebundenen Energiequellen haben, durch die Energiequellen Holz und Geothermie versorgt werden. Noch nicht berücksichtigt wird die Nutzung industrieller Abwärme, da hier noch eine geographische Lokalisierung notwendig ist, bevor eine Zuordnung zu den Verbrauchern möglich ist.

Nachfolgend werden die Potentiale kurz abgeschätzt, wobei die Behandlung der technischen Machbarkeit oder die optimale Verwertung der Energiewertigkeit (Verstromung, Hochtemperaturwärme für Industrie und Gewerbe) den Umfang dieser Potentialanalyse sprengen würde.

4.3.1 Energieholz

Das Energiepotential von Holz wird bei der alleinigen Raumwärme-produktion ungenügend genutzt

Dem Energieträger Holz kommt für die nachhaltige Energieversorgung eine spezielle Bedeutung zu. Dank den hohen Temperaturen, welche mit Holzfeuerungen erreicht werden können, ist Holz für die Versorgung von industriellen Prozessen oder der Stromerzeugung von hohem Wert und darf längerfristig nicht mehr für die Raumwärme- und/oder Warmwasserproduktion eingesetzt werden. Im Vordergrund steht der Einsatz in Wärmekraftkopplungsanlagen und in der Erzeugung von Prozesswärme für die Industrie.

Das langfristige Holzenergiepotential der Schweiz wurde mehrmals untersucht. Eine erste Studie führte INFRAS (28) durch. Sie hatten das Potential des Jahres 2003 zur energetischen Nutzung von Holz aus Wald, Feld und Hecken sowie Alt- und Restholz ermittelt. Die Zahlen wurden von der schweizerischen Hochschule für Landwirtschaft (SHL) in einer Studie im 2010 für das BFE aktualisiert (29).

Gemäss dieser Studie wurde schon 2005 das Energieholzpotential fast zur Hälfte ausgeschöpft. Das waren ca. 3.4 Mio. m³ die sich aus 64% Waldholz, 17% Altholz, 16% Restholz sowie 3% Pellets zusammensetzten.

Die Tendenz der Nutzung ist weiter steigend. Im 2012 wurden schon 4.0 Mio. m³ Holz für Energiezwecke genutzt, womit der Anteil am gesamtschweizerischen Endenergieverbrauch bei 4.0% zu liegen kommt.

*Für die Zukunft erhielten die Autoren der SHL für die maximal mögliche Potentialausschöpfung einen Wert von 7.65 Mio. m³ Holz pro Jahr, der für die Energienutzung eingesetzt werden könnte. Dies entspricht einem **Wärmepotential von ca. 20.5 TWh pro Jahr.***

Das BAFU weist in einer aktuellen Präsentation ein nachhaltig nutzbares Energieholz-Potential von rund 6.0 Mio. m³ pro Jahr resp. 16.1 TWh (Stufe Endenergie) aus, die genutzte Menge wurde für 2008 auf rund 10.7 TWh geschätzt (BAFU, 2012), womit die Ausnutzungsrate damit bei rund 65% liegt.

Energieholz-Potential der Schweiz aktuell zu rund 2/3 ausgeschöpft

4.3.2 Tiefengeothermie

Systeme zur Stromproduktion

Die geothermische Wärme lässt sich grundsätzlich je nach Temperaturniveau zur reinen Wärmeproduktion, Stromproduktion oder einer gekoppelten Wärme-Stromproduktion nutzen. Im Hinblick auf eine potentielle Stromgewinnung aus tiefer Geothermie können grundsätzlich zwei Nutzungstypen unterschieden werden:

- **Hydrothermale Systeme:** Nutzung von natürlich auftretenden tiefen Aquiferen (wasserführende Gesteinsschichten) und
- **Petrothermale Systeme:** Erschließung des «dichten» und «trockenen» Untergrundes durch eine künstliche Erhöhung der vorhandenen Wasserdurchlässigkeit zur Erzeugung eines Wärmetauschers (Enhanced Geothermal Systems, EGS).

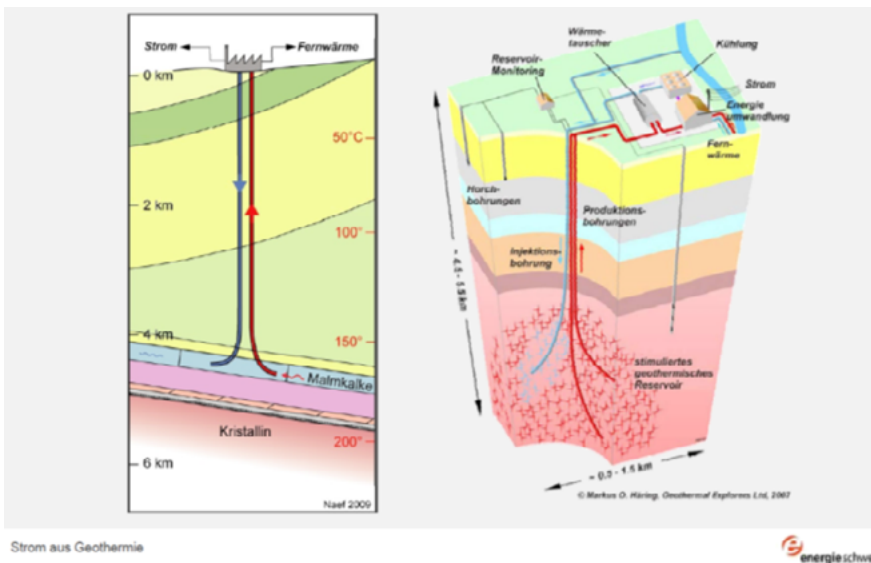


Bild 28: Prinzip von Hydro- und Petrothermale System.

Die prominentesten Vertreter dieser Systeme in der Schweiz sind das Projekt in Basel, wo das petrothermale System realisiert werden sollte und St. Gallen, wo das hydrothermale System umgesetzt werden soll. Kennzahlen zu diesen Projekten sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

| Standort | System | Leistung | | Energie | |
|------------|--------------|------------|-----------|------------|-------------|
| | | Elektrisch | Thermisch | Elektrisch | Thermisch |
| Basel | EGS | 6 MW | 17 MW | 31 GWh/a | 48 GWh/a |
| St. Gallen | Hydrothermal | 2.5–5 MW | 17-20 MW | 7-14 GWh/a | 80-90 GWh/a |

Tabella 6: Kennzahlen der beiden grössten Geothermieprojekten in der Schweiz.

Systeme primär zur Stromproduktion

Die beiden Systeme sind für die kombinierte Wärme- und Stromproduktion konzipiert. Das Leistungsspektrum einer solchen Anlage mit zwei bis drei Tiefenbohrungen liegt bei 3 bis 6 MW_{el}. Die spezifischen Investitionskosten liegen bei 10 Mio. Euro pro MW_{el} (3) und bewegen sich damit im Bereich von neuen Kernkraftwerken. Das grösste Einsparpotential haben die Bohrkosten, die rund zwei Drittel der Investitionen ausmachen. Mit der Entwicklung eines Marktes für Tiefenbohrungen und Etablierung der Technik sinken auch die Bohrkosten. Bis zu 50% soll die Reduktion bis 2050 ausmachen. Dies widerspiegelt sich auch in den Stromgestehungskosten von 40 bis 50 Rp/kWh, die sich langfristig bei 10 bis 20 Rp/kWh einstellen sollen.

Wegen der besseren Energienutzung und höheren Wirtschaftlichkeit sind Standorte mit bestehenden oder potentiellen Nah- und Fernwärmenetzen von prioritärem Interesse. Ein Wärmeleistungsbedarf von ca. 20 MW sollte typischerweise vorliegen.

Neben den hohen Investitionen bilden im Moment noch die Erschütterungen bei der hydraulischen Stimulation des Untergrundes grosse Probleme. In Basel führten sie zum Abbruch des Projektes. Das Verfahren muss noch weiterentwickelt werden, um zukünftig solche Probleme zu vermeiden.

Tiefen-Erdwärmesonden zur alleinigen Wärmeproduktion

Tiefen-Erdwärmesonden zur alleinigen Wärme-produktion sind grund-sätzlich standort-unabhängig

Bei einer alleinigen Wärmenutzung ohne Stromproduktion, vereinfacht sich die Situation deutlich: Mit einer geringeren Bohrtiefe von rund 3'000 m liegen immer noch Bodentemperaturen von 90°C vor. Die Gewinnung von Wärme erfolgt nun mit einer Tiefen-Erdwärmesonde (TEWS) wie in Bild 29 dargestellt.

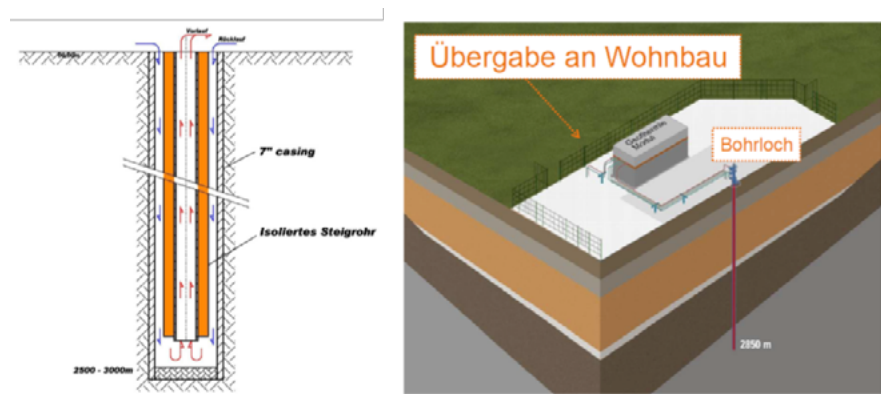


Bild 29 Prinzip tiefen Erdwärmesonde (TEWS).

Der grosse Vorteil dieses Systems ist die geologische Standortunabhängigkeit. Aus geologischer Sicht kann diese Technik überall in der Schweiz angewendet werden. Eine Einschränkung ist jedoch durch den Oberflächenbedarf gegeben. Zur Erstellung der Bohrung sind ca. 5'400 m² notwendig. Damit ist es fast unmöglich, die TEWS in dicht bebauten Gebieten einzusetzen.

Mit einer TEWS lässt sich ein Heizsystem mit rund 50°C Vorlauftemperatur betreiben. Pro Bohrung sind Entnahmeleistungen von ca. 300 kW möglich.

Der grosse Vorteil der TEWS liegt darin, dass keine Wärmepumpen eingesetzt werden müssen. Es sind lediglich Wasser-Umwälzpumpen mit einer Leistung von ca. 15 kW notwendig. Damit erreicht man bei einer Heizleistung von 250 bis 300 kW ein COP von rund 20.

Der Nachteil sind die hohen Investitionen der Bohrung, welche zurzeit bei rund CHF 850 bis CHF 1'100 pro Meter Bohrung liegen. Damit kommen die Wärmege-
stehungskosten in der Grössenordnung von 30 Rp/kWh zu stehen. Das ist ungefähr doppelt so hoch, wie bei heutigen herkömmlichen Wärmepumpenanlagen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Technik für die Strom- und Wärmeerzeugung mit Geothermie vorhanden ist, jedoch noch weiterentwickelt werden muss, um in der Schweiz verbreitet eingesetzt werden zu können. Auch die Investitionen müssen noch reduziert werden, damit die Anlagen konkurrenzfähig zu anderen erneuerbaren Energiequellen werden.

Für die Bestimmung des Wärmepotentials von Geothermie stützen wir uns auf die Aussage der AXPO (30). Sie schätzen das theoretisch langfristig erschliessbare Potenzial der Stromerzeugung für die Schweiz auf etwa 17 TWh_e pro Jahr. Dies würde einer jährlichen **Wärmemenge von 70 TWh_{th} entsprechen.**

Technologie grundsätzlich verfügbar, Weiterentwicklung und Kostenreduktion notwendig

4.4 Wärmepotential erneuerbare Energiequellen

Das ermittelte Wärmepotential aus erneuerbaren Energiequellen in der Schweiz liegt bei rund 240 TWh/a und übersteigt damit den langfristig erreichbaren Wärmebedarf für Raumwärme und Warmwasser um den Faktor 5 resp. den Bedarf von geeigneten Wärmeclustern von 17 TWh/a um den Faktor 14. Es besteht also kein Mangel an verfügbaren erneuerbaren Wärmequellen.

Wärmeangebot übersteigt zukünftigen Bedarf um den Faktor 5

Nachfolgende Zusammenstellung zeigt zusammenfassend die abgeschätzten Potentiale der einzelnen Energiequellen und verdeutlicht die herausragende Bedeutung der Energiequellen der Schweizer Seen sowie der Geothermie.

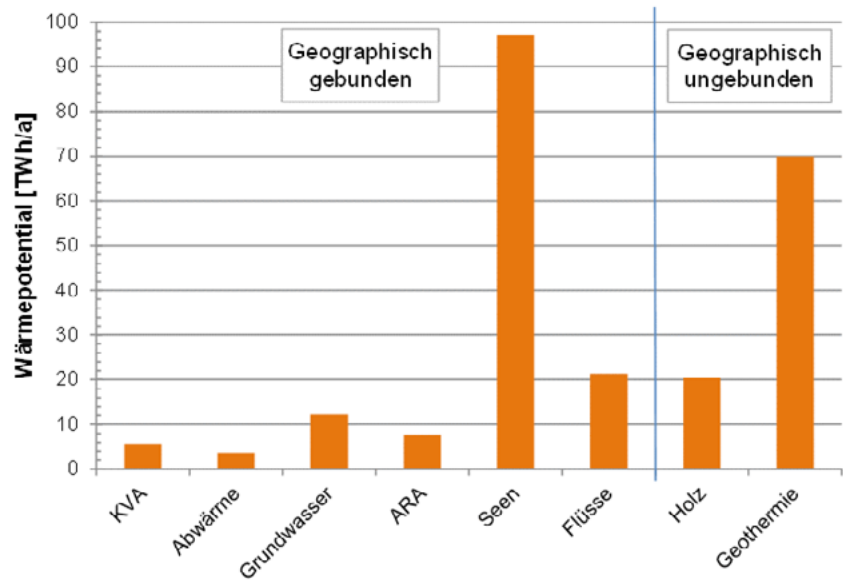


Bild 30: Wärmepotentiale der betrachteten Energiequellen.

| Energiequelle | Wärmepotential |
|--|-----------------------|
| <i>Kehrichtverbrennungsanlagen KVA</i> | <i>5.7 TWh/a</i> |
| <i>Industrielle Abwärme</i> | <i>3.6 TWh/a</i> |
| <i>Grundwasser</i> | <i>12.2 TWh/a</i> |
| <i>Abwasserreinigungsanlagen (ARA)</i> | <i>7.7 TWh/a</i> |
| <i>Seen</i> | <i>97.0 TWh/a</i> |
| <i>Flüsse</i> | <i>23.7 TWh/a</i> |
| <i>Holz</i> | <i>20.0 TWh/a</i> |
| <i>Geothermie</i> | <i>70.0 TWh/a</i> |
| Total | 239.9 TWh/a |

Tabelle 7 Zusammenstellung der ermittelten Wärmepotentiale.

Obschon es sich bei den Betrachtungen um grobe Abschätzungen handelt und noch einige, vor allem technische Fragen zu klären sind, zeigt die Auswertung einerseits das enorme Potential der Umweltwärme und andererseits die grosse, bisher stark unterschätzte Bedeutung der Oberflächengewässer.

**Grosse Potentiale der
Oberflächengewässer**

Durch die oftmalige Angrenzung der grösseren Schweizer Städte an Seen und grössere Flüsse, lässt die verstärkte Nutzung dieser Potentiale als nicht unrealistisch erscheinen, vor allem, wenn man bedenkt, dass mit diesen Energiequellen in vielen Fällen gleichzeitig auch eine Kühlung mit erneuerbarer Energie möglich ist.

5. Zukünftige Nah- und Fernwärmeversorgung

5.1 Methodik

5.1.1 Übersicht

In Kapitel 3 wurden die sinnvollen, zukünftigen Nah- und Fernwärmegebiete lokalisiert und deren Wärmebedarf ermittelt. In Kapitel 4 wurde anschliessend das Wärmeangebot in Form von möglichen erneuerbaren Energiequellen bestimmt, mit der diese Gebiete versorgt werden könnten. Damit sind nun alle Daten vorhanden um die Zuordnung der Wärmenachfrage zum Wärmeangebot zu machen.

Automatische Zuordnung mit GIS unter Berücksichtigung von Potential und geographische Lage

Die Aufgabe besteht darin, den ca. 5'500 Clustern eine der ebenfalls vielen Wärmequellen auf sinnvolle Weise und unter Berücksichtigung der geographischen Lage und des vorhandenen Potentials zuzuordnen. Eine aufwendige Arbeit die wir mit dem Geografischen Informationssystem (GIS) automatisiert haben.

Dazu mussten Zuordnungsalgorithmen entwickelt werden, die mit verfügbaren Analysewerkzeugen des GIS und eigenen Python-Scripts in Berechnungsroutinen umgesetzt wurden.

Diese automatisierte Vorgehensweise anhand von vorgegebenen Regeln hat klar ihre Grenzen und kann nicht z.B. mit einer regionalen Energierichtplanung verglichen werden. So konnte z.B. nicht auf lokale Versorgungsstrategien eingegangen werden, da deren schweizweite Berücksichtigung den Rahmen des Projektes gesprengt hätte.

Eine weitere Einschränkung gibt es noch bezüglich bereits bestehenden Nah- und Fernwärmenetze. Diese konnten nicht berücksichtigt werden, da es schweizweit noch keine Erhebung gibt, die vollständig und georeferenziert ist.

Zur Ermittlung der Ausnützung der Potentiale genügt jedoch der gewählte Berechnungsansatz durchaus und lässt auch zukünftig mit der Variation der Modellannahmen z.B. Sensitivitätsanalysen zu. Ebenso ist eine Erweiterung und Vertiefung der Betrachtung mit den hier gelegten Grundsteinen durchaus möglich.

5.1.2 Prioritäten

Zuordnung mit Prioritäten

Als erstes muss den betrachteten Energiequellen eine Priorität für die Zuordnung zugewiesen werden. Denn oft treten Situationen auf, wo Cluster durch verschiedene Wärmequellen versorgt werden könnten. Um eindeutige Zuordnungen zu erhalten, wurde mit der Prioritätenreihenfolge in Tabelle 8 gearbeitet. Diese Prioritätenliste entstand aus Überlegungen zu der Wertigkeit der Energie (primär Temperaturniveau), Stand der Technik sowie aktuelle Wirtschaftlichkeit der Systeme. Nicht berücksichtigt ist der Mehrwert einer Energiequelle, wenn sie auch zum Kühlen geeignet ist. Dabei sind solche kombinierte Anlagen bereits heute in vielen Fällen auch wirtschaftlich interessant. Berücksichtigt kann dieser Aspekt aber erst dann, wenn auch der Kühlenergiebedarf hektarweise vorliegt.

| Energiequelle | Priorität |
|-----------------------------------|------------------|
| Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) | 1 |
| Grundwasser | 2 |
| Abwasserreinigungsanlagen (ARA) | 3 |
| Seen | 4 |
| Flüsse | 5 |
| Holz | 6 |
| Tiefengeothermie | 7 |

Tabelle 8: Prioritätenliste der Zuordnung.

Diese Prioritäten legen die Reihenfolge der Zuordnung fest. Umgesetzt wurde dies indem zuerst den KVA Cluster zugewiesen wurde, danach dem Grundwasser usw. bis alle Energiequellen durchgearbeitet sind. Die „angeschlossenen“ Cluster sind dabei von der nachfolgenden Zuteilung ausgeschlossen.

5.1.3 Radiale Anschlussdichte

Das grundlegende Problem der Zuordnung von Clustern an Wärmequellen besteht darin, in der Umgebung der Wärmequellen jene Cluster zu ermitteln, deren Anschluss an die Wärmequelle wirtschaftlich tragbar erscheint, das heisst, in unserer Terminologie Wärmeverteilungskosten von weniger als 4.5 Rp/kWh aufweisen.

Entwicklung Algorithmus für die Zuordnung der Wärmequellen mit Cluster mit wirtschaftlichen Kriterien

Im Fernleitungsbau gilt für dieses Problem folgender Grundsatz: Je länger die erforderliche Fernleitung für einen Anschluss ist, desto teurer ist sie und desto mehr Wärme muss durch sie abgesetzt werden können, damit sie noch wirtschaftlich ist. In der Praxis spielt deshalb das Verhältnis von der verkauften Wärme und erforderlichen Fernleitungslänge eine entscheidende Rolle. Diese sogenannte Anschlussdichte sollte mindestens 1.8 MWh pro Jahr und Trassemeter (T_m) Fernleitung betragen (3).

Unser entwickelter Zuordnungsalgorithmus basiert nun auf der Idee dieser Anschlussdichte. Da wir im Moment noch weit entfernt von einer automatischen Generation einer realistisch geführten Fernwärmeleitung sind und damit keine realen Fernleitungslängen zur Verfügung haben, nehmen wir vereinfachend den Abstand r des Clusters von der Wärmequelle zur Hilfe. Mit der Wärmenachfrage Q des Clusters bilden wir die radiale Anschlussdichte ρ_A nach folgender Gleichung:

$$\rho_A = \frac{Q}{r} \quad [3]$$

Graphisch sind diese Grössen in Bild 31 a) mit einer Punktquelle (KVA/ARA) dargestellt.

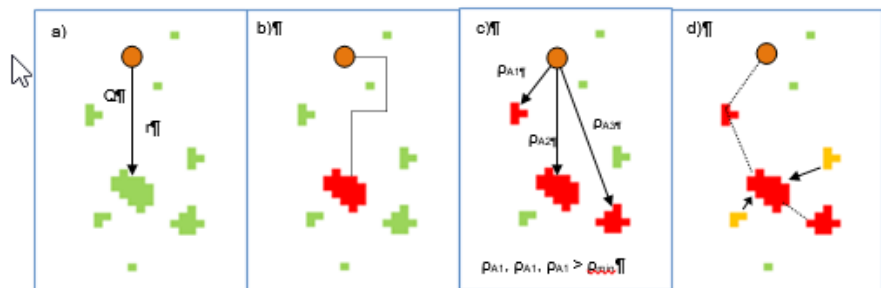


Bild 31: Illustration des Zuordnungsalgorithmus bei einer punktförmigen Quelle. Erklärungen siehe Text.

Diese radiale Anschlussdichte dient uns nun als Anschlusskriterium. Für die Zuordnung werden nur jene Cluster zugelassen, deren radiale Anschlussdichte das festgelegte Minimum ρ_{min} überschreitet.

Der minimale Wert ρ_{min} der radialen Anschlussdichte kann nicht direkt der minimalen, realen Anschlussdichte von 1.8 MWh/aTm gleichgesetzt werden. Dieser Grenzwert wäre je nach Situation zu klein oder zu gross:

- Zu klein wäre er, wenn z.B. ein einzelner Cluster vorhanden wäre (Bild 31 a). Eine reelle Fernleitung ist immer länger als die Luftlinie (Bild 31 b), die wir in den Berechnungen berücksichtigen. Damit müsste der minimale Wert ρ_{min} grösser 1.8 MWh/aTm sein.
- Zu gross wäre er, wenn mehrere Cluster in der Nähe sind. Diese würde man nicht einzeln erschliessen, sondern ähnlich einer Perlschnur (siehe Bild 31 c und d, die punktierte Linie). Die Länge der Einzelererschliessungen ist länger als eine gemeinsame Erschliessung. Damit müsste der minimale Wert kleiner 1.8 MWh/aTm sein.

Daher sind die 1.8 MWh/aTm eher als Richtwert zu verstehen und ein für den Algorithmus geeigneter Grenzwert ist durch Variation zu finden. Im vorliegenden Fall legten wir den Grenzwert ρ_{\min} auf 1.5 MWh/aTm fest.

Der Zuordnungsalgorithmus ist in zwei Schritten aufgeteilt. In einem ersten Schritt erfolgt die Zuordnung nach folgendem Algorithmus:

- Innerhalb eines maximal zulässigen Abstandes r_{\max} von der Wärmequelle werden für alle Cluster die radialen Anschlussdichten ρ_A bestimmt (Bild 32).
- Alle Cluster deren ρ_A den minimalen Wert ρ_{\min} übersteigen, werden als Kandidaten für die Zuordnung ausgewählt.
- Es werden so viele Cluster ausgewählt, bis das Wärmepotential der Wärmequelle ausgeschöpft ist. Dabei werden zuerst jene mit den höchsten ρ_A , d.h. mit der höchsten Rentabilität, ausgewählt (siehe Bild 31 b) rot dargestellt).

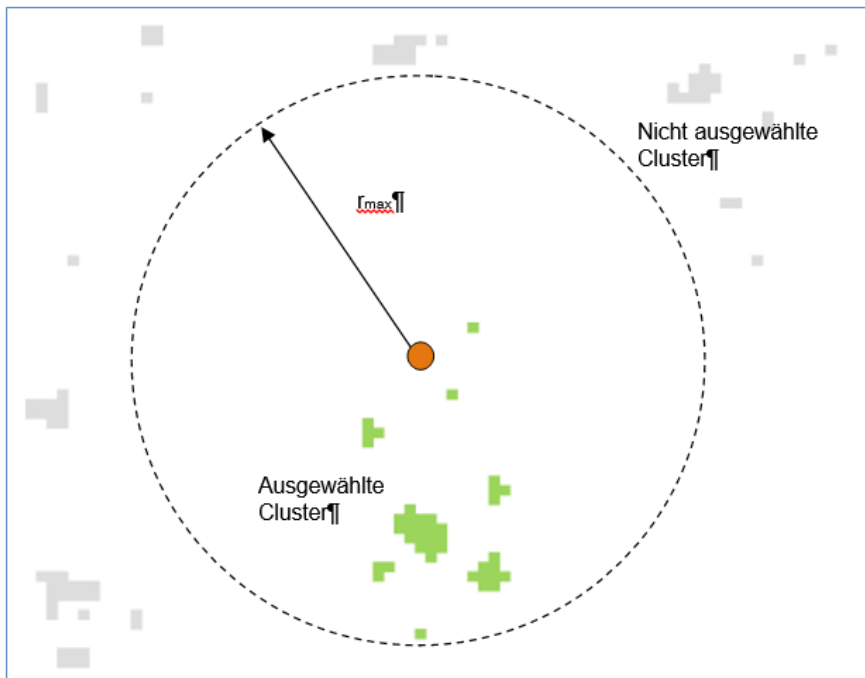


Bild 32: Beschränkung der Anzahl Cluster mit einem maximalen Abstand r_{\max} zur Wärmequelle für die Zuordnung. Hellgrün markiert sind jene Cluster die für die Zuordnung in Frage kommen.

Ermittlung der besten Cluster und weitere Verdichtung von diesen aus

Der maximal zulässige Abstand wurde eingeführt, um in der Praxis unrealistisch lange Fernleitungen zu vermeiden. Je grösser der Abstand, je höher ist auch die Wahrscheinlichkeit, dass topologische Gegebenheiten (Berge, Autobahnen, Flüsse, etc) zwischen Cluster und Wärmequelle eine Fernleitung verteuern oder gar verunmöglichen würde.

Je nachdem wie die Grössenverteilung der Cluster ist, wird das Wärmepotential nicht ausgeschöpft sein. In der Praxis würde man in diesem Fall von den wirtschaftlich erschlossenen Gebieten aus noch weitere Cluster erschliessen. Dies erfolgt im zweiten Schritt unseres Algorithmus:

- Ausgehend von den Clustern die in Schritt 1 bestimmt wurden, werden jene Cluster in deren Nähe ausgewählt, die wiederum mit einer radialen Anschlussdichte grösser ρ_{min} angeschlossen werden können.
- Von diesen Clustern werden so viele ausgewählt, dass das Wärmepotential möglichst ausgenutzt wird.

In Bild 31 c) sind diese zusätzlichen Cluster orange dargestellt.

Damit ist der Kern unseres Algorithmus erklärt. Man kann ihn dort einsetzen wo zwischen Wärmequelle und Cluster ein Abstand besteht. Dies ist bei den punktförmigen Wärmequellen wie KVA oder ARA aber auch den Flächen- resp. Linienquellen, wie Seen und Flüsse, der Fall. Daher sind sie prinzipiell für die Methode der radialen Anschlussdichte geeignet. Bei den Flüssen ist einzig noch die gegenseitige Abhängigkeit der Flussarme zu beachten (siehe dazu nachfolgendes Kapitel 5.2.5).

Beim Grundwasser grundsätzlich anderer Algorithmus entwickelt

Beim Grundwasser mussten wir anders vorgehen. Wir haben aus Wirtschaftlichkeitsgründen nur Wärmeverbraucher die auf dem Grundwassergebiet stehen, berücksichtigt. Daher gibt es im Prinzip kein Abstandsproblem für das der vorgestellte Algorithmus entwickelt wurde. Daher haben wir dort einen anderen Algorithmus entwickelt. Dieser ist in Kapitel 5.2.2 Grundwasser beschrieben.

Natürlich könnte bei einem sehr grossen Grundwasservorkommen auch eine Grossfassung erfolgen und das Grundwasser über ein Leitungssystem verteilt werden. Davon haben wir bisher abgesehen, um das Grundwasserpotential nicht zu überschätzen.

Der vorgestellte Algorithmus könnte noch weiter ausgebaut und verfeinert werden um eine noch realistischere Zuordnung zu erreichen. Dazu gehört die Berücksichtigung von topologischen Kriterien die den Fernleitungsbau beeinflussen wie z.B. Höhendifferenz. Ein weiterer Punkt ist die Erweiterung der Clustereigenschaft insofern, dass mehr als eine Wärmequelle ein Nah- und Fernwärmegebiet versorgen darf. Auch die Priorisierung könnte mit weiteren Regeln, basierend auf Erfahrung im Fernleitungsbau, verfeinert werden.

Für die vorliegende Fragestellung sehen wir momentan den Algorithmus als hinreichend genau an.

5.2 Zuordnung von lokalisierten Energiequellen

5.2.1 Zuordnung Kehrrechtverbrennungsanlagen (KVA)

Der maximal zulässige Abstand r_{max} für die Zuordnung wurde auf 5 km gesetzt. Die hohe Temperatur der Wärme macht es attraktiv, auch grössere Distanzen zu überwinden, wie z.B. die 4.6 km lange Leitung von der KVA Gamsen zur Lonza zeigt.

Zur Illustration der erhaltenen Zuordnung sind in Bild 33 die ermittelten Versorgungsgebiete am Beispiel der KVA Colombier dargestellt.

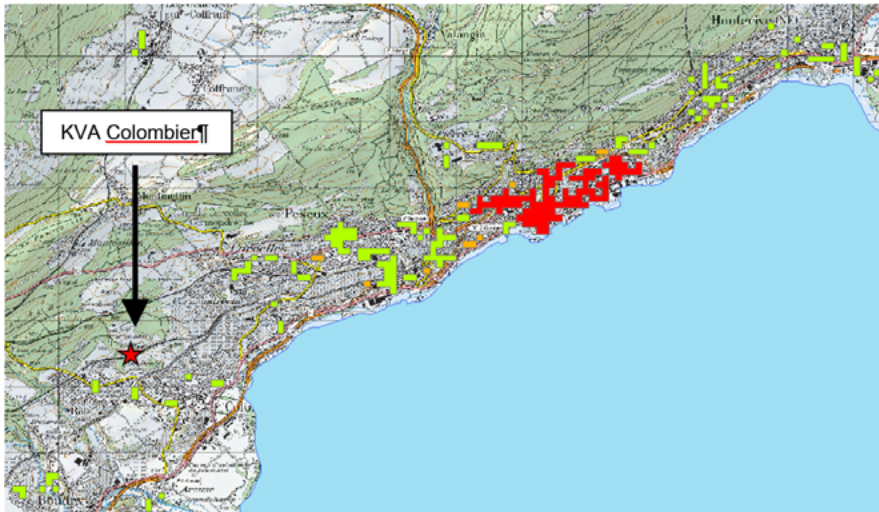


Bild 33 Beispiel KVA Colombier: Rot ist derjenige Cluster markiert, der sich am meisten lohnt anzuschliessen. Orange sind jene markiert, die ergänzend angeschossen werden können um das Potential auszuschöpfen. Grüne Cluster sind nicht zugeordnet.

Im Bild 34 sind die Wärmepotentiale und die ermittelte absetzbare Wärmemenge der KVA dargestellt. Es zeigt sich, dass nicht immer das gesamte Wärmepotential abgesetzt werden kann. Dies liegt in erster Linie daran, dass KVA's primär zur Abfallentsorgung gebaut wurden und das nicht unbedingt in der Nähe von dichten Siedlungsgebieten.

Bei den KVA's besteht ungenutztes, wirtschaftliches Abwärmepotential

Aus der Sicht der Energieplanung muss deshalb beim Ersatz von KVA der Standort überdacht und eine Lösung gefunden werden, die eine optimale Energieausnutzung erlaubt.

Von dem angenommenen Wärmepotential von 5.7 TWh/a konnten 3.6 TWh/a Clustern zugeordnet werden. Damit lassen sich rund 21% des ausgewiesenen Fernwärmepotentials von 17 TWh/a decken.

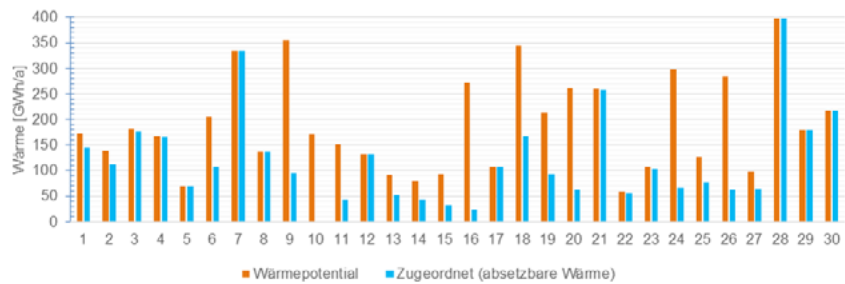


Bild 34: Verfügbares Wärmepotential (orange) und abgesetzte Wärme (hellblau) der KVA.

Die Graphik zeigt, dass bei einigen KVA das verfügbare Potential nicht ausgeschöpft wird, während bei anderen die absetzbare Wärme durch die verfügbare Wärme limitiert wird. Aus energetischer Sicht müsste daher in Zukunft eine Verschiebung des Abfalls in Anlagen erfolgen, bei denen das absetzbare Potential grösser ist als die verfügbare Wärme.

5.2.2 Zuordnung Grundwasser

Im Gegensatz zu den anderen Wärmequellen erfolgt die Zuordnung von Grundwasser nach einem eigenen Algorithmus. Die Grundbedingung bei der Zuordnung ist, dass sich ein Cluster auf Grundwassergebiet befindet. Der Algorithmus filtert also zuerst die Cluster heraus, die sich ganz im Grundwassergebiet befinden. Danach wird für jedes Grundwassergebiet eine Liste mit Clustern erstellt.

Diese Listen werden dann vom grössten Wärmebedarf zum kleinsten hin mit einem Zuordnungsalgorithmus so durchgearbeitet, dass das Wärmepotential des jeweiligen Grundwassergebietes möglichst ausgeschöpft wird.

Zuteilung der best-geeigneten Cluster bis das Potential ausgeschöpft ist

Der Algorithmus stellt so sicher, dass die verfügbaren Potentiale nicht übernutzt und dass die bestgeeigneten Cluster prioritär einer Nutzung zugeführt werden.

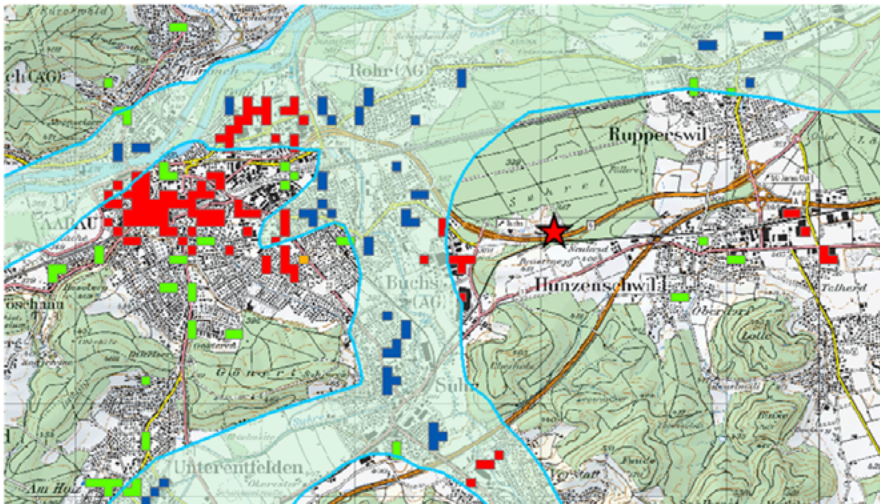


Bild 35 Grundwasserzuordnung (blau) am Beispiel von Aarau. Rot jene Cluster, welche der KVA (Stern) zugeordnet wurden, für die Grünen konnten keine Potentiale zugeordnet werden.

Die Grundbedingung, dass sich ein Cluster auf Grundwassergebiet befindet, ist streng und muss in der Praxis nicht unbedingt zutreffen, wie das Beispiel Aarau zeigt. Dort ist die Versorgung von Gebieten vorgesehen, die nicht auf dem Grundwassergebiet stehen. Dies hängt mit einer hohen Grundwasserverfügbarkeit und der Möglichkeit, auch mit Grundwasser zu kühlen, zusammen. Das Grundwasser wird auf der Zuströmseite vor der Stadt gefasst und verteilt.

Auf der anderen Seite ist eine strenge und damit zurückhaltende Zuordnung durchaus angebracht, um nicht einen unrealistischen Absatz von Wärme aus Grundwasser zu prognostizieren.

Vom angenommenen Potential von 12.2 TWh/a wurden damit 1.9 TWh/a an Cluster zugeordnet, was rund 11% des Fernwärmepotentials entspricht.

5.2.3 Zuordnung Abwasserreinigungsanlagen (ARA)

Der maximal zulässige Abstand r_{max} für die Zuordnung wurde auf 1.5 km gesetzt. Ansonsten wurde gleich vorgegangen wie bei den KVA. D.h. der Zuordnungsalgorithmus konnte unverändert übernommen werden.

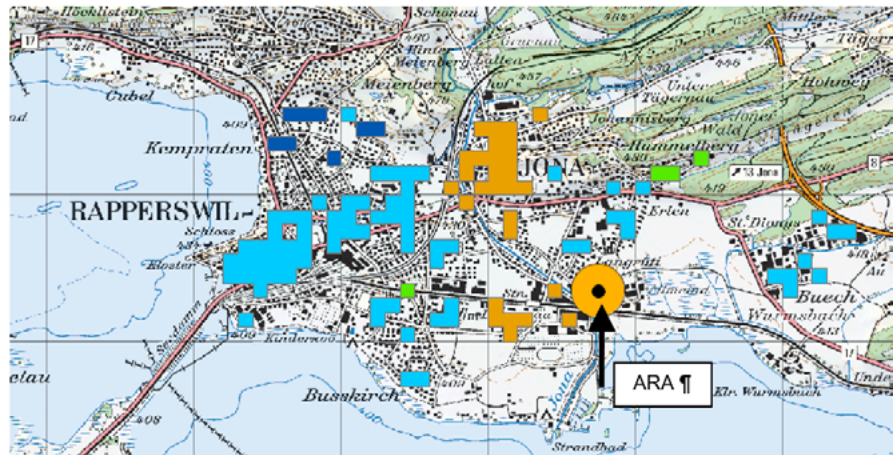


Bild 36: Beispiel Zuordnung ARA: Der orange Kreis mit schwarzem Punkt markiert den Standort der ARA, orange sind auch die ihr zugeordneten Cluster eingefärbt (hellblau = Grundwasser; dunkelblau = See, grün = nicht zugeordnet).

Von den 297 berücksichtigten ARA's konnten gemäss dieser Zuordnung 138 keine Wärme an Clustern abgeben. Damit zeigt sich hier dasselbe Bild wie bei einigen KVA's, dass sie nämlich bezüglich Abwärmenutzung an eher ungünstigen Orten stehen. Das erklärt auch warum nur rund 1.9 TWh/a von den möglichen 7.7 TWh/a zugeordnet werden konnten.

Allerdings muss auch hier erwähnt werden, dass sich bei einer erweiterten lokalen Betrachtung Verschiebungen der Versorgung aus Gründen der Wirtschaftlichkeit, zum Beispiel von der ARA-Abwärme zu See- oder Flusswasser, ergeben können.

5.2.4 Zuordnung Seen

Der maximal zulässige Abstand r_{max} für die Zuordnung wurde auf 3 km gesetzt. Dies soll den Umstand berücksichtigen, dass mit Seewasser auch gekühlt und damit eine verbesserte Wirtschaftlichkeit, als bei einer alleinigen Wärmenutzung, erzielt werden kann. Bei den Seen werden die Abstände zu den Clustern vom Rand an gemessen. Ansonsten ist es wiederum derselbe Algorithmus. Nicht berücksichtigt wurde bisher der Höhenunterschied innerhalb eines Clusters, was in einigen Gebieten, mit steilen Seeuferrn, eine Überschätzung des Potentials nach sich ziehen kann.

Von dem enormen Potential von 97 TWh/a konnten 5.1 TWh/a an Cluster zugeordnet werden.

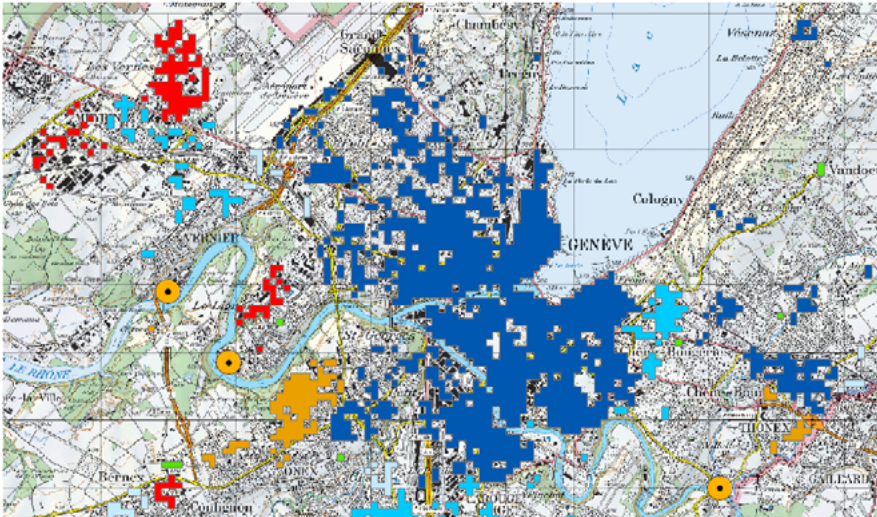


Bild 37: Beispiel Zuordnung See: dunkelblaue Cluster sind dem See zugeordnet (orange = ARA, hellblau = Grundwasser, rot = KVA).

5.2.5 Zuordnung Flüsse

Flüsse sind komplexer als Seen. Ausgehend vom Quellgebiet vereinigen sie sich mit anderen Flüssen oder fließen in einen See. Damit verändert sich ihr Wasservolumenstrom und damit auch das Wärmepotential (siehe Kapitel 4.2.6). Wir betrachten die Flüsse daher Abschnittsweise, in dem ihr Wasservolumenstrom etwa gleich bleibt (Prinzip siehe Bild 38).

Das Wärmepotential jedes Flussabschnittes ist abhängig von den vorgängigen (falls vorhanden). Wurde in einem vorherigen Abschnitt schon Wärme entnommen hat sich das Wasser schon um einen Teil der zulässigen 1.0 K abgekühlt und das Wärmepotential verringert sich entsprechend. Betrachten wir dazu den Fluss im Abschnitt A_3 (Bild 38). Er setzt sich aus den Zuflüssen A_1 und A_2 zusammen. Damit ist das Wärmepotential $Q_{A_3}^p$ im Abschnitt A_3 gleich der Summe aus A_1 und A_2 , also:

$$Q_{A_3}^p = Q_{A_1}^p + Q_{A_2}^p \quad [4]$$

Wenn in A_1 und A_2 das Flusswasser abgekühlt wird, hat das Auswirkungen auf den Abschnitt A_3 . Denn das Wärmepotential $Q_{A_3}^p$ wird um die Wärmeentnahmen in den vorhergehenden Abschnitten vermindert:

$$Q_{A_3}^p = (Q_{A_1}^p - Q_{A_1}^w) + (Q_{A_2}^p - Q_{A_2}^w) \quad [5]$$

Diese Verkleinerung des Wärmepotentials muss bei der Zuordnung berücksichtigt werden. Ansonsten kann es zu einer Überbewertung des Flusspotentials führen.

Ein Spezialfall ergibt sich dann, wenn sich ein See im Flusslauf befindet. Dann gilt dessen Abfluss (A_5) als regeneriert und die vorangehenden Abschnitte (A_1 , A_2 und A_3) müssen nicht berücksichtigt werden.

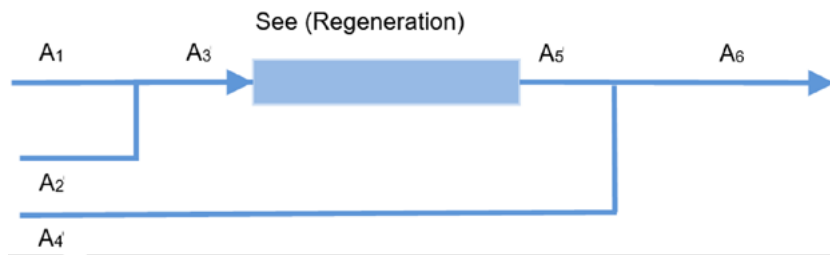


Bild 38: Abhängigkeit der Wärmepotentiale in Flüssen zwischen verschiedenen Abschnitten.

Der Zuordnungsalgorithmus wurde folgendermassen modifiziert:

- Schritt 1 und 2 gemäss Kapitel 5.1.3 wurden an den einzelnen Abschnitten durchgeführt.
- Anhand der Beziehung [5] erstellten Abhängigkeitsmatrix wurden alle Abschnitte dahingehend geprüft, dass nicht zu viel Wärme entzogen wurde.
- Falls die Bilanz in [5] negativ wurde, wurden die Wärmepotentiale angepasst und der Zuordnungsalgorithmus noch einmal gestartet.

Der maximal zulässige Abstand r_{\max} für die Zuordnung wurde auf 3 km gesetzt.

Von dem Wärmepotential von 21.3 TWh/a konnten 1.8 TWh/a zugeordnet werden.

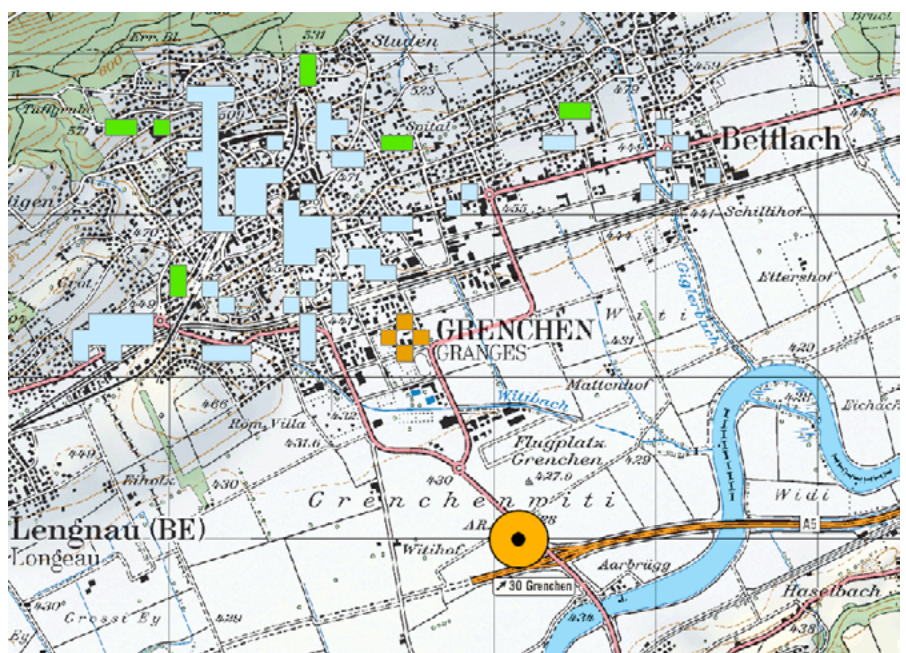


Bild 39: Beispiel Zuordnung Fluss bei Grenchen (hellblaue Cluster).

5.3 Zuordnung nicht lokalisierter Energiequellen

Mit der Zuordnung der lokalisierten Energiequellen konnte bisher 14.3 TWh/a der gesamthaften 17.3 TWh/a gedeckt werden. Somit fehlen 3.0 TWh/a, die mit nicht lokalisierten Energiequellen gedeckt werden könnten. Das Bild 40 zeigt die Grössenverteilung der verbliebenen Cluster.

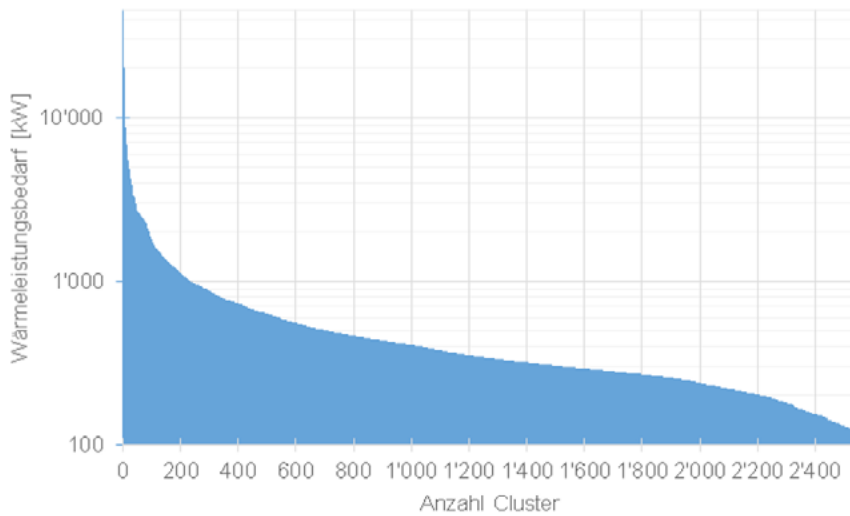


Bild 40: Grössenverteilung der Cluster ohne zugeordnete Energiequelle

Das Spektrum beinhaltet wenige ganz grosse Cluster und viele kleine Cluster. In der Tabelle 9 ist die Verteilung in Wärmeleistungsklassen zusammengefasst.

| Leistungsklasse | Anzahl | Wärmebedarf Total | Verteilung Wärmebedarf | Zugeordnete Technologien |
|-----------------|--------|-------------------|------------------------|--------------------------|
| 20 – 50 MW | 3 | 0.2 TWh/a | 7 % | Tiefengeothermie |
| 10 – 20 MW | 3 | 0.1 TWh/a | 3 % | Holzheizkraftwerke |
| 0.5 – 10 MW | 701 | 1.6 TWh/a | 54 % | Holzfeuerungen |
| Kleiner 0.5 MW | 1'838 | 1.1 TWh/a | 36 % | Erdwärmesonden |
| Total | | 3.0 TWh/a | 100 % | |

Tabelle 9: Wärmeleistungsklassen der Cluster ohne zugeordnete Wärmequelle.

Die höchste Leistungsklasse mit 20 MW und mehr Wärmeleistungsbedarf sind prädestiniert für Tiefengeothermie. Einer der drei Cluster befindet sich in St. Gallen, wo ein hydrothermales tiefengeothermisches System geplant ist. Ein weiterer würde allerdings mit einer KVA zum grössten Teil versorgt werden, wenn dies unser Modell zulassen würde (Weiterentwicklung).

Die nächste tiefere Leistungsklasse liegt bei 10 bis 20 MW. Das ist ein Bereich, welcher für Holzheizkraftwerke mit Stromerzeugung geeignet ist. Der Absatz ist gross genug, um eine solche Holz-WKK-Anlage rentabel zu betreiben. Auch hier sind allerdings bloss 3 geeignete Cluster vorhanden. Das zeigt, dass die Holz-Wärme-kraftkopplung mit der bisherigen Technologie im Raumwärmebereich, ausser in den vorhandenen grossen Fernheiznetzen, nur ein sehr geringes Potential aufweist.

Der folgende Bereich von 0.5 bis 10 MW könnte von der Technologie her mit Holzschnitzelfeuerungen versorgt werden. Der Anteil am gesamten Wärmepotential von Holz wäre unter 8%. Damit würde nur ein kleiner Teil für die energetisch nicht optimale Raumwärme und Warmwasseraufbereitung eingesetzt.

Für die kleinste Leistungsklasse unter 0.5 MW könnten schon herkömmliche, bivalente Erdsondenanlagen eingesetzt werden, da sich diese Cluster meist auch auf dem Land befinden, wo eine Platzbeschränkung kaum vorhanden ist. In dieser Grössenklasse kommen sogar bivalente Anlagen mit Umgebungsluft in Frage.

Mit diesen Annahmen könnte der restliche Wärmebedarf von 3.0 TWh/a mit Holz und Geothermie gedeckt werden.

Ein noch unbekannter Teil könnte die Abwärmenutzung aus industriellen Prozessen beitragen. Bevor eine entsprechende Abschätzung möglich ist, muss aber noch eine Potentialabklärung mit geographischer Zuordnung erfolgen.

| Erneuerbare Wärmequelle | Zugeordnete Wärmemenge |
|--------------------------------|-------------------------------|
| Holz | 1.7 TWh/a |
| Geothermie (tiefe und untiefe) | 1.3 TWh/a |

Tabelle 10: Zusammenfassung der Zuordnung nicht lokalisierter Energieträger.

5.4 Resultat

Zusammenfassend für alle Wärmequellen ergeben sich folgende Zuordnungen an das ausgewiesene Potential für Nah- und Fernwärme von rund 17 TWh/a:

| Wärmequelle | Wärmepotential [TWh/a] | Zugeordnet [TWh/a] | Deckung an FW |
|-----------------------|------------------------|--------------------|------------------|
| KVA | 5.7 | 3.6 | 21% |
| Direkte AWN Industrie | 3.6 | Nicht zugeordnet | Nicht zugeordnet |
| Grundwasser | 12.2 | 1.9 | 11% |
| ARA | 7.7 | 1.9 | 11% |
| Seen | 97.0 | 5.1 | 29% |
| Flüsse | 21.3 | 1.8 | 10% |
| Holz | 20.5 | 1.7 | 10% |
| Geothermie | 70.0 | 1.3 | 8% |
| Total | 238.0 | 17.3 | 100% |

Tabelle 11: Wärmepotential und resultierende Zuordnung.

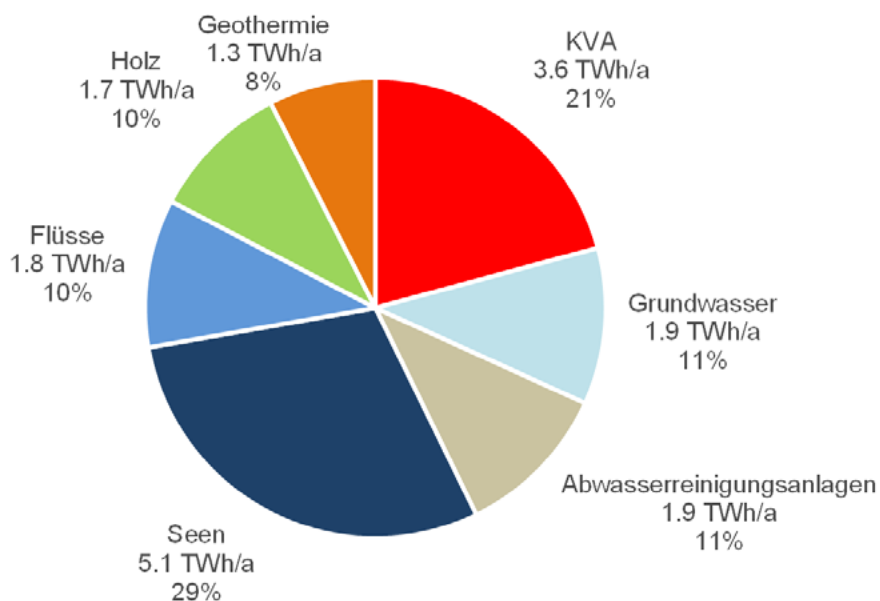


Bild 41: Aufteilung der zugeordneten Wärmequellen am Nah- und Fernwärmepotential.

Mit den getroffenen Annahmen lassen sich also 100% des ausgewiesenen Nah- und Fernwärmepotentials mit den betrachteten erneuerbaren Wärmequellen versorgen. Geordnet nach der Wertigkeit der Wärme lassen sich weitere Aussagen aus dem Resultat ableiten.

Direkt nutzbare Wärme

Wirtschaftlich besonders interessant ist die Nutzung von Abwärme, welche mit einer Temperatur von über 70°C anfällt, da diese direkt genutzt werden kann. Diese Bedingung erfüllen die KVA und die direkte Nutzung industrieller Abwärme. Allein die Abwärme aus Kehrlichtverbrennungsanlagen kann etwa ein Fünftel des langfristigen Bedarfs von 17 TWh/a für Nah- und Fernwärmesysteme decken. Die direkte Nutzung industrieller Abwärme könnte diesen Anteil auf fast 50% erhöhen. Allerdings ist es mit den bisher verfügbaren Zahlen nicht möglich, den effektiv nutzbaren Anteil zu bestimmen.

Indirekt nutzbare Wärme

Indirekt nutzbare Wärme muss mittels einer Wärmepumpe auf ein nutzbares Temperaturniveau, das heisst auf ca. 65°C, angehoben werden. Damit könnte der ganze Bedarf an Raumwärme und Warmwasser gedeckt werden. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen wird in Nah- und Fernwärmenetzen bei sehr tiefen Aussentemperaturen mit einer Vorlauftemperatur von mindestens 90°C gearbeitet. Die macht den Einsatz eines fossil betriebenen Spitzenkessels notwendig, welcher 40 bis 50% der maximalen Wärmeleistung und etwa 10% der Jahresenergie erbringt.

Grosses Potential bei Seen

Den grössten Anteil an indirekt nutzbarer erneuerbarer Wärme liefern die natürlichen Wasserressourcen der Schweiz also Seen, Flüsse und Grundwasser. Bereits ohne Flüsse beträgt die Deckung am langfristigen Bedarf etwa 1/3. Von besonderer Wichtigkeit ist der Umstand, dass mit See- und Grundwasser nicht nur geheizt, sondern auch direkt gekühlt werden kann, was die Anwendung entsprechender Systeme wirtschaftlich deutlich verbessert.

Zu beachten ist noch, dass die ARA mit einem Anteil von 11% am langfristigen Bedarf einen wichtigen Beitrag leisten.

6. Ausblick

Mit der erstmaligen Zusammenführung der geographisch gebundenen erneuerbaren Energien und der Wärme-Cluster konnte aufgezeigt werden, dass ein beachtlicher Anteil von 38% des langfristigen Bedarfs für Raumwärme und Warmwasser durch erneuerbare Energien mittels Wärmeverteilnetzen abgedeckt werden kann.

Mit den vorliegenden Grundlagenarbeiten werden konkrete Schritte zur Umsetzung und Nutzung der ausgewiesenen Potentiale erfolgen. Nebst den bereits eingeleiteten Transferleistungen erachten wir vor allem folgende Themengebiete, welche im Rahmen von weiteren Projektschritten bearbeitet werden sollten als wichtig.

Umsetzung der Ergebnisse

- 1. Präsentation der Ergebnisse an potentielle Nutzer (Energiedienstleister, Contractoren, Planer, Kantone usw.). Anpassung des öffentlich zugänglichen webGIS.*
- 2. Veröffentlichungen in entsprechenden Publikationsorganen. Das sind:*
 - Tec21*
 - Energiefachbuch*
 - Euroheat & Power*
- 3. Öffentliche Präsentationen an Veranstaltungen.*
- 4. Verstärkung der konkreten Umsetzungsaktivitäten zusammen mit Energiestadt, Energiedienstleistern und Contractoren.*

Ergänzung und Vervollständigung der vorliegende GIS Analysen

- 5. Erfassung bestehender Nah- und Fernwärmenetze und Übernahme in das web-GIS.*
- 6. Grundlegende Untersuchungen zu den industriellen Abwärmquellen mit dem Ziel, hektarbezogene verfügbare Abwärme mit Temperaturniveaus zu erhalten.*
- 7. Einbezug der Kälte mit Temperaturen grösser 8°C (Klimakälte). Ermittlung des hektarbezogenen Kältebedarfs, ausgehend von den verschiedenen Gebäudetypen und Nutzungen. Ermittlung des Anteils erneuerbarer Kälte, welcher aus Grund-, See- und Flusswasser gedeckt werden könnte.*

A. Anhang

A.1 Literaturverzeichnis

1. Wagner, H.-J., et al. Validierung und kommunale Disaggregation des Expertensystems HERAKLES. s.l. : Ruhr-Universität Bochum, 2002.
2. Kirchner, Almut, et al. Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050. Basel : Bundesamt für Energie BFE, 2012.
3. Bacher, Binz, Eicher, Iten; Keller. Energierespekt, Faktorverlag 2013. ISBN: 978-3-905711-27-1.
4. Erb, Markus und Gutzwiler, Stephan. Ausbau von WKK in der Schweiz: WKK-Standortevaluation auf Basis einer GIS-Analyse. Dr. Eicher+Pauli AG. Sarren : V3E-Verband Effiziente Energie Erzeugung, 2011.
5. Erb, Markus, Gutzwiler, Stephan und Kaufmann, Urs. Fossile BHKW - Potential und Standortevaluation im Rahmen der Entwicklung der BFE WKK - Strategie. Dr. Eicher + Pauli AG. Bern : Bundesamt für Energie, BFE, 2012.
6. Dettli, Reto, Müller, Mathias und Ott, Walther. Zukunft der Nah- und Fernwärme in der Schweiz. Zürich : econcept, 2006.
7. Energiestadt. Räumliche Energieplanung - Werkzeuge für eine zukunftstaugliche Wärmeversorgung. Ettenhausen : EnergieSchweiz für Gemeinden, c/o Nova Energie GmbH, 2011.
8. Klingler, Georg, Ott, Walter und Rom, Noemi. Die Zukunft leitungsgebundener Energieversorgungssysteme. Econcept. Bern : Bundesamt für Energie, 2011.
9. Stumpf et al., K. Zusammensetzung der Siedlungsabfälle der Schweiz 1992/1993. Schriftenreihe Umwelt, BUWAL. Dez. 1995, 248.
10. Entsorgung + Recycling Zürich. Überprüfung der Kapazitäts- und Standortplanung der thermischen Verwertung von Abfällen im Kanton Zürich 2012 - 2035. Zürich : AWEL, ZVA, 2012.
11. Liechti, Jörg. Energieoptimierung der KVA. Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) Zürich, Verband der Betriebsleiter und Betreiber Schweizerischer Abfallbehandlungsanlagen (VBSA), Bern. 2012.
12. Kuchler, Fabien. Identification des rejets thermiques industriels en Valais. Centre de Recherches Energétiques et Municipales. Sion : Kanton Wallis, Dienststelle für Energie und Wasserkraft, 2012.
13. Pehnt, Martin, et al. Die Nutzung industrieller Abwärme- technisch-wirtschaftliche Potentiale und energiepolitische Umsetzung. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung. Heidelberg : s.n., 2010.
14. Kirchner, Almut, et al. Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2010 nach Verwendungszwecken. Bern : Bundesamt für Energie BFE, 2011.
15. Eggen, Bernhard und Anton, Sres. Richtplan Energie Teil B: Bericht zum Richtplan Energie. Lyss : Gemeinde Lyss, 2011.
16. Ryser Ingenieure AG. Heizen und Kühlen mit Abwasser. Zürich : Baudirektion Kanton Zürich, AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kt. Zürichs, 2010.
17. EAWAG. Abwasserentsorgung 2025 in der Schweiz. Dübendorf : Eawag, 2012. Schriftenreihe der Eawag Nr. 21.
18. Gutzwiler, Stephan, Rigassi, Reto und Eicher, Hanspeter. Abwasserwärmenutzung, Potential, Wirtschaftlichkeit und Förderung. Liestal : BFE, 2008.
19. Geologiebüro Lienert & Haering AG. Grundwasser-Wärmepotential im Talboden von Ebnat-Kappel und Wattwil - Potentialanalyse. Energietal toggenburg. 2011.
20. Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft. Energienutzung aus Untergrund und Grundwasser - Planungshilfe. Zürich : s.n., 2010.

21. Wüest, Alfred. *Potential zur Wärmeenergienutzung aus dem Zürichsee*. EAWAG, Kastanienbaum. Zürich : AWEL, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Kanton Zürich, 2012.
22. *Liste der grössten Seen der Schweiz*. Wikipedia. [Online] [Zitat vom: 25. Oktober 2013.] http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_gr%C3%B6ssten_Seen_in_der_Schweiz.
23. Bundesamt für Topologie. *Die grössten Seen und höchsten Berge*. Bern : Bundesamt für Umwelt, BFS, 2009.
24. Reinartz, Ralf. *Auswirkungen der Gewässererwärmung auf die Physiologie und Ökologie der Süsswasserfische Bayerns*. [Hrsg.] Bayrisches Landesamt für Umwelt. Referat 57 - Gewässerökologie. 2007.
25. Lange, Jörg. *Wärmelast Rhein*. Mainz : Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND), 2009.
26. *Gewässerschutzverordnung (GSchV)*. 1998, Stand 2011.
27. Bundesamt für Umwelt, BAFU. *Hydrologische Grundlagen und Daten*. [Online] 2013. <http://www.hydrodaten.admin.ch/de/>.
28. INFRAS. *Potentiale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz*. Bern : Bundesamt für Energie, 2004.
29. Pauli, Bernhard, Bürgi, Patric und Brühlhard, Stefan. *Holz als Rohstoff und Energieträger*. Bern : Bundesamt für Energie BFE, 2010.
30. AXPO. *Strom für heute und morgen: Stromperspektiven 2020 - neue Erkenntnisse*. 2010.
31. Doppelreiter, David. *Tiefe Erdwärmesonde-nachhaltige, verlässliche und preis-stabile Wärme*. Wien : RAG, 2013. Präsentation.
32. Wandschneider + Gutjahr Ingenieurgesellschaft mbH, Hamburg. *Materialien zum „Stand der Technik“ für die Energienutzung in KVA*. Zürich : AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, 2011.
33. Oppermann, Gerhard, Gutzwiler, Stephan und Müller, Ernst A. *Projektentwicklung Fernwärme Schweiz - Abwärmennutzung aus (de)zentralen Quellen der Industrie und Umwelt*. s.l. : Bundesamt für Energie, BFE, 2010.
34. VFS, Verband Fernwärme Schweiz. *webGIS*. s.l. : www.fernwaerme-schweiz.ch.
35. Morf, Leo. *Materialien zum „Stand der Technik“ für die Energienutzung in KVA*. Wandschneider + Gutjahr Ingenieurgesellschaft mbH, Hamburg. Zürich : Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, 2011.
36. Renz, Stefan. *Bundesamt für Energie Forschungsprogramm Wärmepumpen und Kältetechnik: Schwerpunkte 2013-16*. [Hrsg.] Bundesamt für Energie (BFE). *News aus der Wärmepumpen-Forschung, 19. Tagung des BFE-Forschungsprogramms „Wärmepumpen und Kälte“*. 26. Juni 2013, S. 9- 21.
37. Ryttec AG, Münsingen. *Einheitliche Heizwert- und Energiekennzahlenberechnung der Schweizer KVA nach europäischem Standardverfahren*. Bern : Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, 2013.

A.2 Danksagung

Das Projekt konnte dank der Finanzierung durch folgende Organisationen durchgeführt werden:

- *Bundesamt für Energie BFE*
- *Fernwärme-Forum*
- *Brugg Rohrsystem AG, Kleindöttingen*
- *Axpo AG, Baden*
- *Hoval AG, Feldmeilen*
- *Caliqua AG, Basel*
- *Schmid AG, Eschlikon*
- *AEW Energie AG, Aarau*
- *Logstor Schweiz AG, Regensdorf*

Finanziell hat sich auch die Dr. Eicher+Pauli AG in Form von Eigenleistungen beteiligt.

Zum Schluss sei an dieser Stelle auch Herrn Dr. Peter Meier, GEO-Energie Suisse AG, für die Inputs zum Thema Geothermie gedankt.

eicher+pauli

Planer für Energie- und Gebäudetechnik

*Dr. Eicher+Pauli AG
Stauffacherstrasse 65, CH-3014 Bern
Tel. 031 370 14 14
Fax 031 370 14 15
info@eicher-pauli.ch
www.eicher-pauli.ch*

fernwärme

Die Komfort-Energie

65

*Verband Fernwärme Schweiz (VFS)
Walter Böhlen
Römerweg 2
5443 Niederrohrdorf
info@fernwaerme-schweiz.ch
www.fernwaerme-schweiz.ch*