

Schlussbericht, 15. Mai 2020

Wärmepumpen in Thermischen Netzen

Referenzblatt



energie schweiz

Unser Engagement: unsere Zukunft.

Autoren

Diego Hangartner, HSLU

Joachim Ködel, HSLU

Beat Wellig, HSLU

**Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.
Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.**

Adresse

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Postadresse: 3003 Bern
Infoline 0848 444 444. www.energieschweiz.ch/beratung
energieschweiz@bfe.admin.ch, www.energieschweiz.ch

Inhalt

1	Ausgangslage	4
2	Effizienz und Wirtschaftlichkeit	5
3	Anwendungsmöglichkeiten	8
3.1	Hydraulische Einbindung	10
4	Kältemittel	11
5	Barrieren / Chancen	14
6	Literaturverzeichnis	16

1 Ausgangslage

Thermische Netze ermöglichen, Wärme grossflächig zu verteilen und gezielt lokale erneuerbare Energien zu nutzen. Heutzutage werden rund 8 TWh/a [1], d.h. etwa 10 % der Wärmeversorgung werden über thermische Netze verteilt. Das Weissbuch Fernwärme [2] hat bis 2050 ein Potenzial von 17 TWh/a prognostiziert unter der Annahme, dass vermehrt erneuerbare Energiequellen genutzt werden. Die Bedingung, um ein thermisches Netz rentabel zu betreiben ist ein genügender Wärmeabsatz im versorgten Gebiet (z.B. Liniendichte > 2000 MWh/km*a [3]) oder das Vorhandensein einer sehr günstigen hochwertigen Energiequelle.

Bis jetzt wurden thermische Netze mehrheitlich von Energiequellen wie Abwärme aus Kehrriichtverbrennungsanlagen (KVA), Verbrennung von fossilen Energieträgern und vermehrt von Biomasse gespeisen. Das Potenzial von Umweltwärme wie Grundwasser, See- und Flusswasser sowie Erdwärme respektive auch das Potenzial von industrieller Abwärme und Abwärme aus Kälteprozessen ist noch gross und soll in Zukunft weiter ausgebaut werden. Die Temperatur dieser Quellen befinden sich häufig nahe der Umgebungstemperatur. Für die Heizung und Aufbereitung von Warmwasser wird entsprechend ein Temperaturhub durch eine Wärmepumpe benötigt. Gemäss einer Projektliste [4] aus dem Verband Fernwärme Schweiz (VFS), ergänzt mit einer Recherche¹ der Hochschule Luzern (HSLU), wurde Umweltwärme in Zusammenhang mit Wärmepumpen in den letzten Jahren bereits vermehrt genutzt. Der Anteil Wärmepumpen in thermischen Netzen wird in den nächsten Jahren dank grösseren Seewassernutzungsprojekten, wie Genève Lac Nations (GLN) [5], Seenergy Luzern [6], Circulago Zug [7], etc. aber auch Abwärmenutzung von Abwasserreinigungsanlagen (ARA) von etwa 3 % auf 17 % der installierten Leistung steigen. Das Potenzial der Nutzung von Wärmequellen mit niedrigen Temperaturen in thermischen Netzen in Kombination mit Wärmepumpen könnte gemäss Weissbuch Fernwärme bis auf 70 % gesteigert werden [2].

Dieses Referenzblatt fasst die wichtigsten Grundlagen und Stand der Dinge zu diesem vergleichsweise relativ neuen Thema zusammen. Es werden vor allem die bereits erstellten Grundlagen des IEA Annex 47² – *Heat Pumps in District Heating and Cooling Systems* – als Basis verwendet und die Erkenntnisse kompakt dargestellt.

¹ Eine Liste mit rund tausend thermische Netze wurden als Datenpunkte auf geo.admin.ch [8] Ende 2019 aufgeschaltet.

² <https://heatpumpingtechnologies.org/annex47/>

2 Effizienz und Wirtschaftlichkeit

Durch den stets höheren bauphysikalischen Standard der Gebäude – bessere Dämmung und Einbau von Fussbodenheizungen – werden tiefere Vorlauftemperaturen für die Raumwärme benötigt und entsprechend steigt das Potenzial zur ökonomisch und ökologisch sinnvollen Integration von Wärmepumpen in thermische Netzen; denn, je tiefer die Vorlauftemperaturen, desto höher die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe. Abbildung 1 zeigt die Effizienz von verschiedenen industriellen Wärmepumpen in Abhängigkeit des äusseren Temperaturhubes.

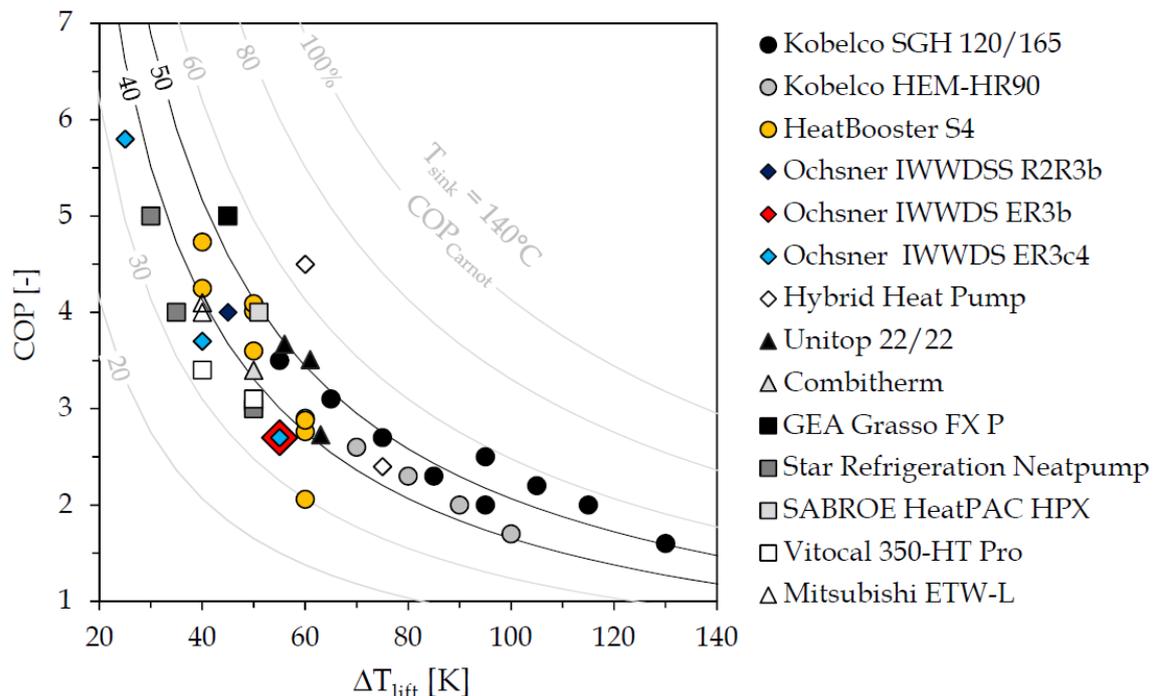


Abbildung 1: COP von verschiedenen industriellen Wärmepumpen in Abhängigkeit des äusseren Temperaturhubes, d.h. der Temperaturdifferenz zwischen Senkenaustritt und Quelleneintritt. [9]

Der Wirkungsgrad, respektive der *Coefficient of Performance* (COP) einer Wärmepumpe ist gemäss dem Carnot-Wirkungsgrad umgekehrt proportional zum Temperaturunterschied zwischen Quelle und Senke. Für Heizzwecke wird mit einer Wasser/Wasser-Wärmepumpe häufig ein Temperaturhub von rund 25 K benötigt: Eine Quelle wie Grundwasser befindet sich auf 10 °C und es wird Wärme auf 35 °C (Fussbodenheizung) erzeugt. Die Wärmepumpen haben dann einen COP-Wert von rund 5. Aus Abb. 1 ist ersichtlich, dass bei Wärmepumpen-Systemen die kleinstmöglichen nötigen Vorlauftemperaturen gewählt werden sollten. Vor allem bei Temperaturhuben unter rund 50 K ist pro Kelvin höherem Hub eine spürbare Effizienzeinbusse zu vermerken.

Wärmepumpen weisen gegenüber anderen Technologien bedeutsame Vorteile auf. In folgender Tabelle werden eine fossile Heizung, eine Biomassenanlage (Holzschnitzelheizung) und eine Wärmepumpe bezüglich Kosten und Umweltbelastung qualitativ verglichen.

Energieerzeugung	Fossil	Biomasse	Wärmepumpe
Investitionen	++	0	-
Betriebs- und Wartungskosten	+	+	++
Energiekosten	++	+	+
CO ₂ -Emissionen	--	++	++
Effizienz	0	0	++

Tabelle 1: Qualitativer Vergleich zwischen drei Heizsystemen. (++) positive, (--) negative, (0) neutrale Eigenschaften.

Tabelle 1 zeigt, dass der grösste Nachteil der Wärmepumpe die Anfangsinvestition ist, insbesondere bei Sole/Wasser- oder Wasser/Wasser-Wärmepumpen. Eine solche Wärmepumpe kostet im Durchschnitt rund drei Mal mehr als ein fossiler Heizkessel [10]. Ansonsten schneidet die Wärmepumpe in allen Bereichen besser oder gleichwertig als die fossilen oder biomassenbasierten Heizungen, vor allem bei den Betriebskosten, Effizienz und Umweltbelastung.

Ein Kriterium, welches den Einsatz von Wärmepumpen gegenüber Konkurrenztechnologien stark bestimmt, ist das Preisverhältnis zwischen fossilen Energieträger und Strom. Folgende Graphik zeigt den durchschnittlichen Strom- und Gaspreis von Haushalten aus verschiedenen Länder Europas. Zusätzlich sind die Bereiche mit dem Gas/Strom-Preisverhältnis (ϵ) dargestellt [11].

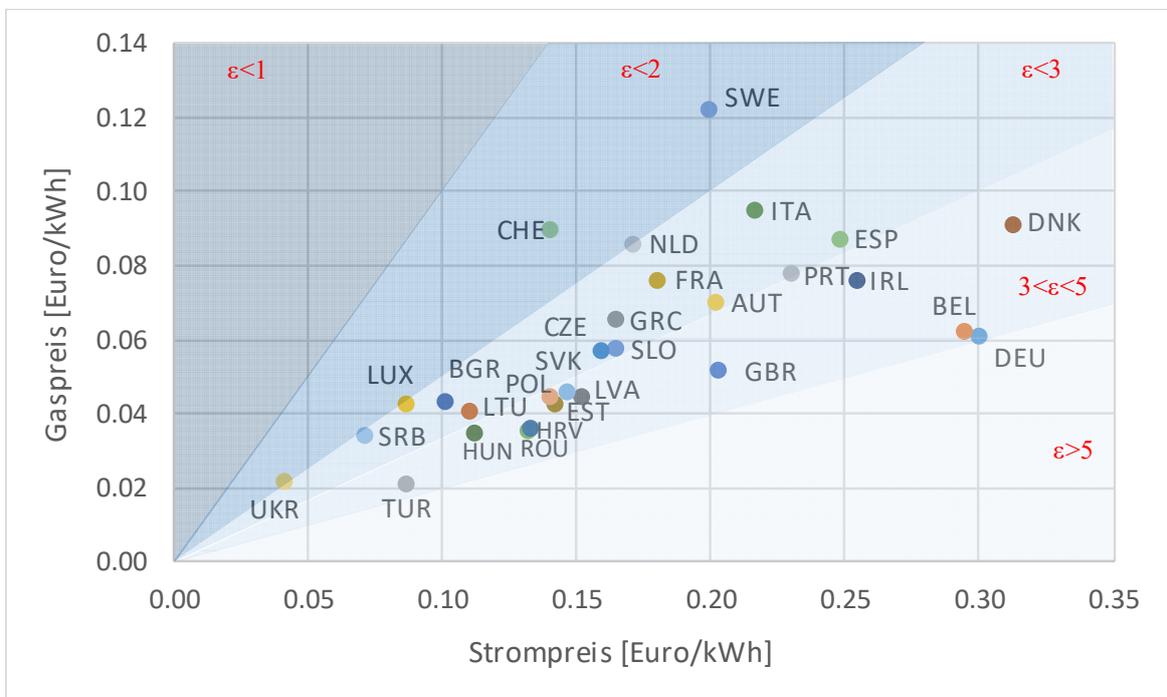


Abbildung 2: Gaspreis vs. Strompreis von verschiedenen Länder Europas mit den Bereichen

$\epsilon = \text{Gaspreis/Strompreis}$. [11]

Schweden und die Schweiz haben mit einem Gas/Strom-Preisverhältnis unter zwei die besten Randbedingungen für den Einsatz von Wärmepumpen. In der Tat hat Schweden auch eine lange Tradition mit dem Einsatz von Wärmepumpen in thermischen Netzen. Im Moment wird rund 10 % der Energie, welche über Fernwärme verteilt wird, durch den Einsatz von Wärmepumpen gedeckt.

Wärmepumpen werden heutzutage anzahlmässig mehrheitlich in einem Leistungsbereich unter 20 kW eingesetzt, wie in EFHs und kleinen MFHs [12]. Es werden häufig Standardanlagen eingesetzt und die verkauften Wärmepumpen decken einen ähnlichen Temperaturbereich ab (Produktgeschäft). In thermischen Netzen werden oft projektspezifische Spezial-Wärmepumpen eingesetzt, welche von Fachspezialisten ausgeschrieben und bedarfsgerecht hergestellt werden (Anlagengeschäft). Diese nicht-seriellen, besser auf die Anwendung abgestimmte Planung und Herstellung von Grosswärmepumpen hat aber höhere Erstellungskosten zur Folge.

Die Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpen kann markant verbessert werden, indem die Wärmepumpe gleichzeitig für Heiz- und Kühlzwecke verwendet wird. Beispielsweise können Serverräume gekühlt und die Abwärme in ein thermisches Netz eingespeist werden. Der COP der Anlage verdoppelt sich dann beinahe gemäss untenstehender Formel [9]:

$$\text{COP}_{\text{H+K}} = 2 \cdot \text{COP}_{\text{H}} - 1$$

In Stockholm wird die Abwärme aus Serverräumen und Einkaufszentren genutzt, um Liegenschaften mit Wärme zu versorgen. In diesem Fall fungieren die Kälteanlagen auch als Wärmepumpe (Abbildung 3).

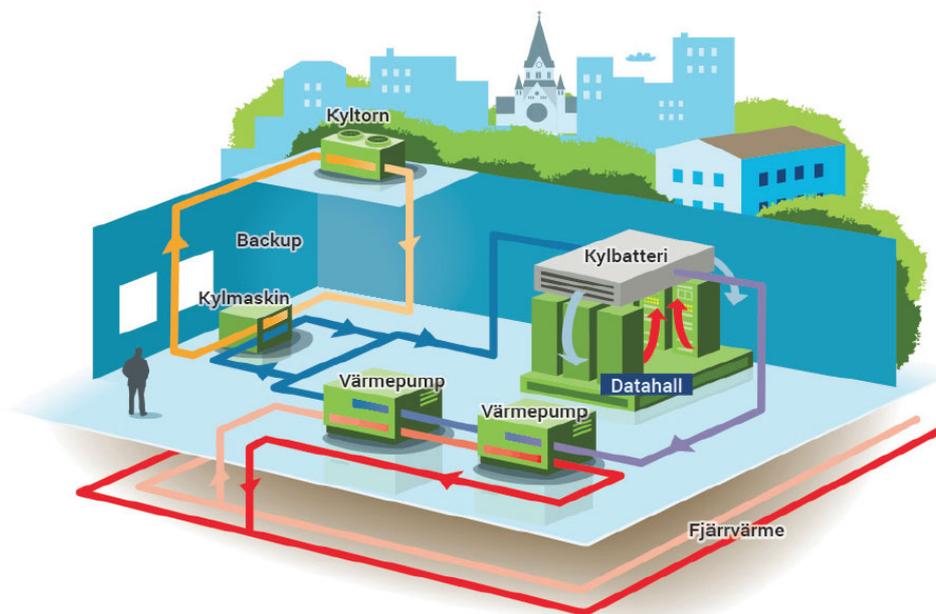


Abbildung 3: Fallbeispiel Öppen Fjärrvärme in Stockholm mit Abwärmenutzung aus der Kühlung von Serverräume. [13]

3.1 Hydraulische Einbindung

Nachfolgend werden für die Nutzung von Grundwasser bei rund 11 °C ein Heizungsschema für die zentrale und dezentrale Einbindung von Wärmepumpen in einem Fernwärmenetz zur Versorgung eines Wohnquartiers dargestellt [14].

Zentrale Wärmeaufbereitung Raumwärme und Warmwasser.

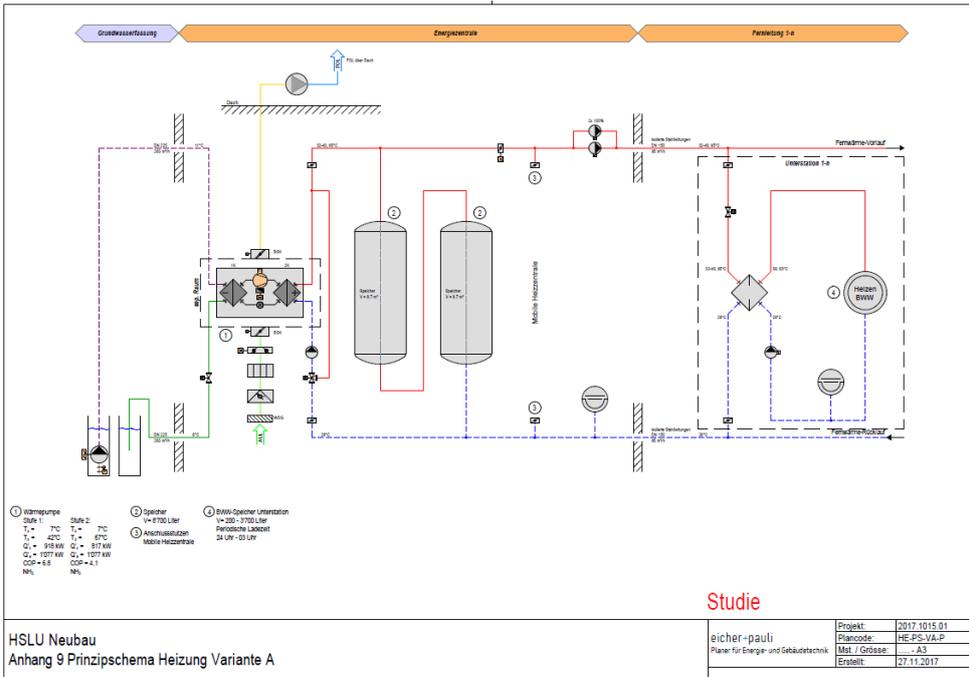


Abbildung 4: Zentrale Wärmeaufbereitung über Wärmepumpen und Hochtemperaturnetz.

Zentrale Wärmeaufbereitung Raumwärme und dezentrale Aufbereitung Warmwasser.

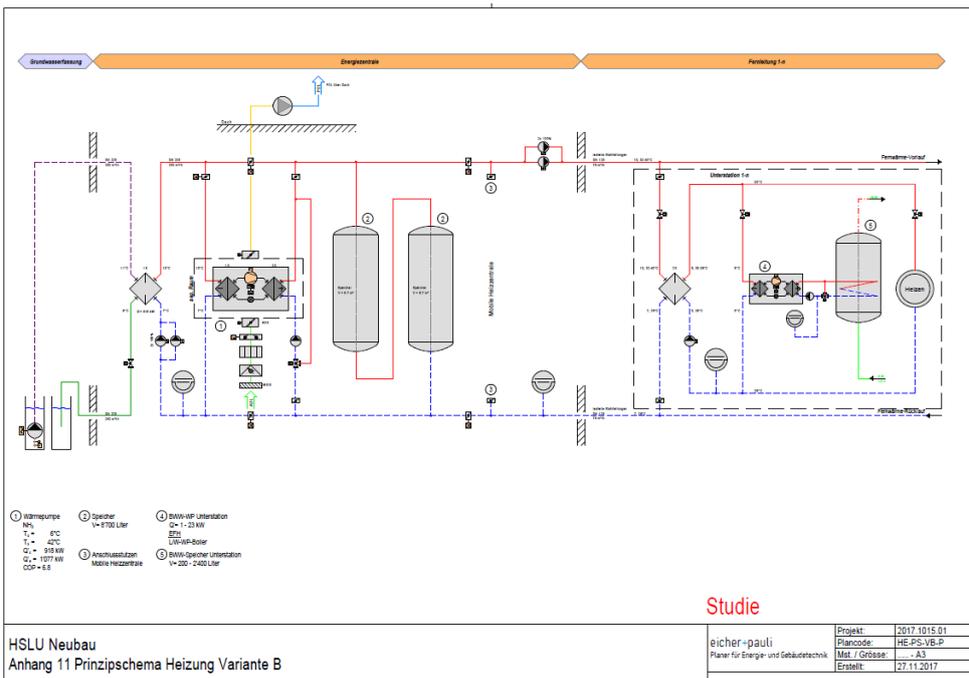


Abbildung 5: Zentrale Aufbereitung der Raumwärme und dezentrale Aufbereitung von Warmwasser über WP.

Dezentrale Wärmeaufbereitung Raumwärme und Warmwasser.

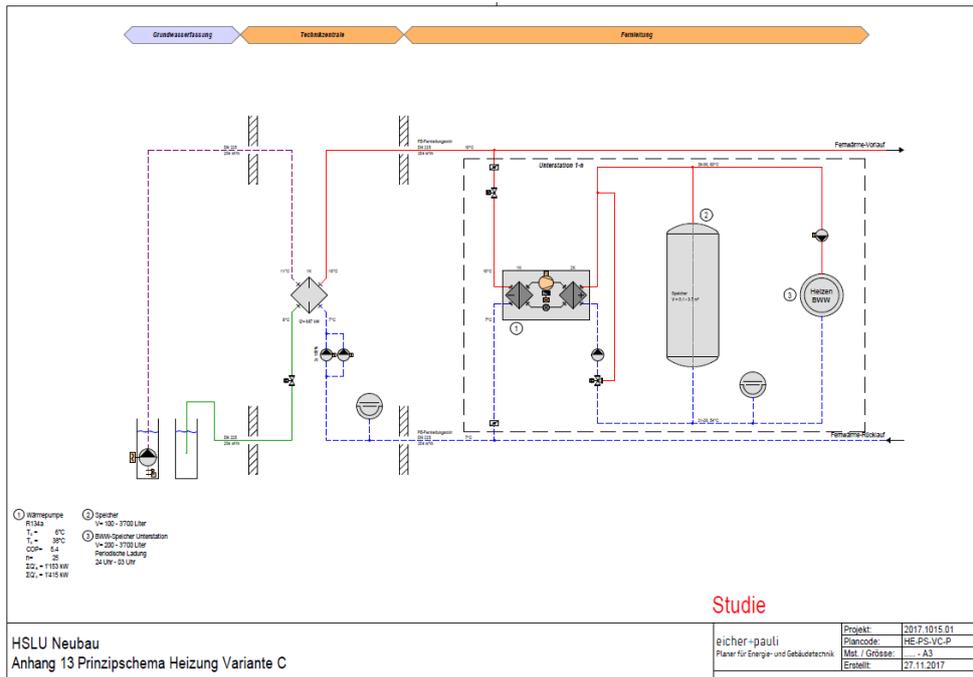


Abbildung 6: Dezentrale Aufbereitung in den einzelnen Gebäuden und Tieftemperaturnetz

4 Kältemittel

Kältemittel haben einen besonderen Einfluss auf die Entwicklung und den Betrieb von Wärmepumpen. Einerseits sollten Kältemittel gute Eigenschaften betreffend Effizienz und Sicherheit aufweisen, andererseits geringe Umweltauswirkungen. Bei Freisetzung haben die meisten Kältemittel eine negative Auswirkung auf die Atmosphäre, sei es durch ihre ozonabbauende Wirkung und/oder dass sie als Treibhausgas wirken. Zur Quantifizierung des Treibhauseffekts wird der GWP-Wert (Global Warming Potential) verwendet. Das Ozonabbaupotenzial wird mit dem ODP-Wert (Ozone Depletion Potential) beschrieben. Die Umsetzung des Montreal-Protokolls im Jahr 1994 bewirkte die Einführung der HFKW-Kältemittel (Hydrogen-Fluor-Kohlen-Wasserstoff) als Ersatz für die ozonabbauenden, chlorhaltigen FCKW-Kältemittel (Fluor-Chlor-Kohlen-Wasserstoff). Seit dem 1. Januar 2015 sind das Inverkehrbringen von Kältemitteln mit HFKW (Hydrogen-Fluor-Chlor-Kohlen-Wasserstoff) sowie deren Verwendung zum Nachfüllen von Kälteanlagen verboten. FKW (Fluor-Kohlen-Wasserstoff) und HFKW sind nur noch begrenzt einsetzbar, d.h. in Zukunft sind nur Kältemittel ohne ODP und mit tiefem GWP erlaubt (siehe Abbildung 7).

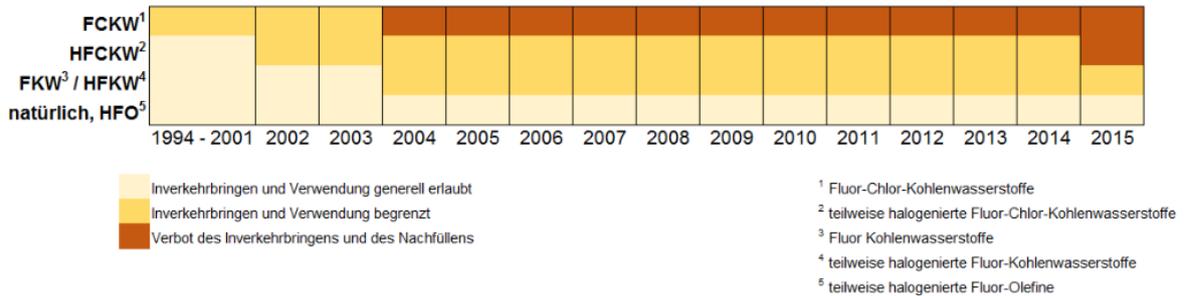


Abbildung 7: Entwicklung der Einsatzmöglichkeit von Kältemittel in Wärmepumpen. [15]

Aufgrund des «Phase-Down» der HFKW-Kältemittel (F-Gase Verordnung in der EU) ist die Branche gefordert, Wärmepumpen für neue Kältemittel zu entwickeln. Als Nachfolge-Kältemittel kommen z.B. Hydrofluorolefine (HFO, z.B. R1234yf, R1234ze) infrage, welche bereits für die Fahrzeugklimatisierung eingesetzt werden. Alternativ können natürliche Kältemittel (z.B. R290, R744) verwendet werden, welche ebenfalls geringe GWP-Werte aufweisen und deshalb von den genannten Regulierungen nicht betroffen sind. Diese Entwicklung hat direkt einen Einfluss auf die Herstellungskosten der Wärmepumpenanlagen, da einige natürliche Kältemittel wie Propan, Ethan oder Ammoniak meist aufwändiger bezüglich Sicherheit zu handhaben sind.

Gemäss der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung ChemRRV³ (Stand Februar 2020) sind grundsätzlich Anlagen mit einem Ozonabbaupotenzial über 0.0005 nicht zulässig. Weiter gibt es für Wärmepumpen eine Unterscheidung je nach installierter Leistung und Treibhauspotenzial des eingesetzten Kältemittels. Für Wärmepumpen mit einer installierten Leistung über 600 kW sind nur noch HFO- oder natürliche Kältemittel zulässig. Zwischen 100 kW und 600 kW können Kältemittel mit einem GWP-Wert unter 2100 nur in einer beschränkten Füllmenge verwendet werden. Bei Wärmepumpen unter 100 kW Leistung können Kältemittel mit einem GWP-Wert kleiner oder gleich 2100 überall eingesetzt werden (siehe Abbildung 8).

ozonschichtabbauende Kältemittel

ODP ≤ 0.0005	wenn kein Ersatz nach dem Stand der Technik**** und Massnahmen zur Emissionsreduktion getroffen werden
ODP > 0.0005	nicht zulässig

4. Wärmepumpen (Nutzung hauptsächlich zur Wärmeerzeugung)

GWP ≤ 2100	zulässig	Füllmengenbegrenzung für Luftwärmetauscher zur Wärmeabgabe (siehe Punkt 6)	nicht zulässig*
GWP > 2100	nicht zulässig*		
	Q _{0K} ≤ 100 kW	100 kW < Q _{0K} ≤ 600 kW	Q _{0K} > 600 kW

Abbildung 8: Dezentrale Aufbereitung in den einzelnen Gebäuden und Tieftemperaturnetz

³ ChemRRV, Absatz 2.1, Ziff. 1, Buchstaben a & ChemRRV, Absatz 2.1, Ziff. 3, Buchstaben d

Die nachfolgende Tabelle zeigt eine Zusammenstellung von den meist verwendeten Kältemitteln mit ihrer Zulässigkeit für die drei Leistungskategorien von Wärmepumpen gemäss der neuen ChemRRV.

Typ	R-	Name	ODP	GWP	WP ≤ 100 kW	100 kW < WP ≤ 600 kW	WP > 600 kW
FCKW	11	Trichlorfluormethan	1	4750	Verboten	Verboten	Verboten
	12	Dichlordifluormethan	1	10900	Verboten	Verboten	Verboten
	502	Mix R-22 / R-115	0,33	4657	Verboten	Verboten	Verboten
HFCKW	22	Chlordifluormethan	0,055	1810	Verboten	Verboten	Verboten
	401A	Mix R-22 / R-152a / R-124	0,033	1182	Verboten	Verboten	Verboten
	402A	Mix R-22 / R-125 / R-290	0,019	2788	Verboten	Verboten	Verboten
	402B	Mix R-22 / R-125 / R-290	0,030	2416	Verboten	Verboten	Verboten
	408A	Mix R-22 / R-125 / R-143a	0,024	3152	Verboten	Verboten	Verboten
	409A	Mix R-22 / R-142b / R-124	0,046	1585	Verboten	Verboten	Verboten
HFKW / FKW	23	Fluoroform	0	14800	Verboten	Verboten	Verboten
	32	Difluormethan	0	675	Zulässig	Beschränkt	Verboten
	134a	1,1,1,2-Tetrafluorethan	0	1430	Zulässig	Beschränkt	Verboten
		Mix R-125 / R-134a / R-143a				Verboten	
	404A		0	3920	Verboten		Verboten
	407C	Mix R-32 / R-125 / R-134a	0	1770	Zulässig	Beschränkt	Verboten
	407F	Mix R-32 / R-125 / R-134a	0	1825	Zulässig	Beschränkt	Verboten
		Mix R-125 / R-134a / R-600(a)					
	417A		0	2350	Verboten	Verboten	Verboten
		Mix R-125 / R-134a / R-600a					
	422A		0	3140	Verboten	Verboten	Verboten
	Mix R-125 / R-134a / R-600a						
422D		0	2730	Verboten	Verboten	Verboten	
	Mix R-124 / R-134a / R-600a / R-601						
437A		0	1685	Zulässig	Beschränkt	Verboten	
507A	Mix R-125 / R-143a	0	3980	Verboten	Verboten	Verboten	
HFO	1234yf	2,3,3,3-Tetrafluorpropen	0	4	Zulässig	Zulässig	Zulässig
	1234ze	1,3,3,3-Tetrafluorpropen	0	7	Zulässig	Zulässig	Zulässig
Natürlich	170	Ethan	0	6	Zulässig	Zulässig	Zulässig
	290	Propan	0	3	Zulässig	Zulässig	Zulässig
	600a	Isobutan	0	3	Zulässig	Zulässig	Zulässig
	717	Ammoniak (NH ₃)	0	0	Zulässig	Zulässig	Zulässig
	744	Kohlendioxid (CO ₂)	0	1	Zulässig	Zulässig	Zulässig
	1270	Propen	0	2	Zulässig	Zulässig	Zulässig

Tabelle 2: Kältemittel mit Bezeichnung, Ozonabbaupotenzial (ODP), Erwärmungspotenzial (GWP) und Einsatzmöglichkeit in Wärmepumpen je nach Wärmeleistungskategorie gemäss der ChemRRV. [16]

5 Barrieren / Chancen

Die Barrieren für die Implementierung von Wärmepumpen in thermischen Netzen sind oft nicht technischer Natur, sondern ökonomischer oder sozioökonomischer Natur. Abbildung 9 zeigt, dass die hohen Investitionen bei Wärmepumpen eine grosse Hürde darstellen sowie die tiefen Öl- und Gaspreise auf dem Markt. Bei den gesellschaftlichen Aspekten steht der Systemwechsel und Mangel an Vertrauen in neue Systeme im Vordergrund, insbesondere bei kleinen privatbetriebenen Anlagen. Ebenfalls bei existierenden Holzwärmeverbände wird der Einsatz von Wärmepumpen stark hinterfragt, da eine «neue» Technologie ins System eingefügt wird. Die Abbildung wurde dem Task 4 Bericht des Annex 47 entnommen [17].

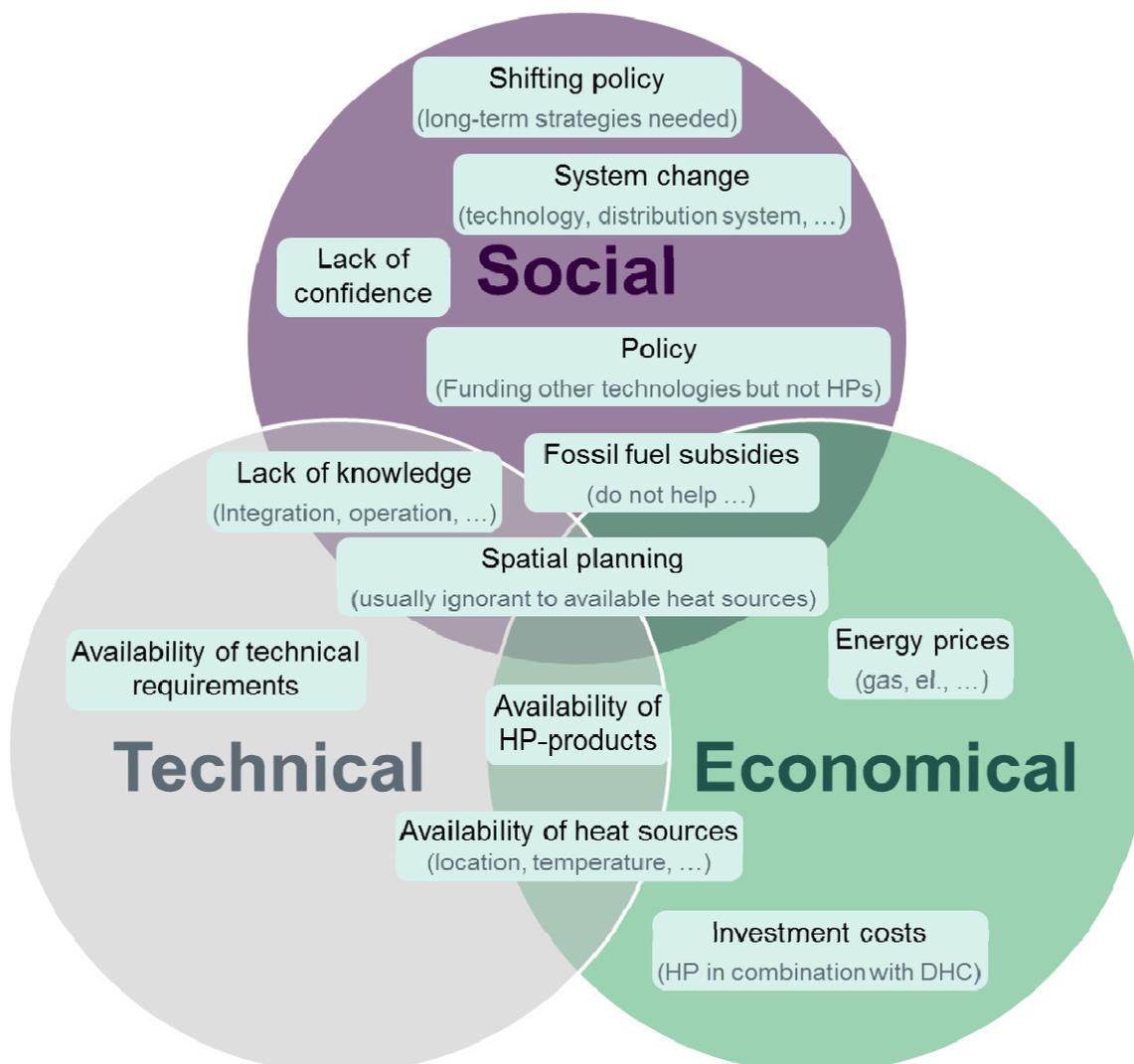


Abbildung 9: Darstellung von technischen und sozio-ökonomischen Barrieren von Wärmepumpen in thermischen Netzen. [17]

Aus Abbildung 10 ist ersichtlich, dass ein grosser Hebel im Bereich Politik und Förderung angesetzt werden kann. Auf der anderen Seite kann aber auch im technischen Bereich mit der Erstellung von Grundlagen, wie Leitfaden, und die Aus- und Weiterbildung viel dazu beitragen, die gesellschaftlichen Aspekte zu entschärfen. Neben der Politik und Technik ist das entsprechende Geschäftsmodell ebenfalls relevant.

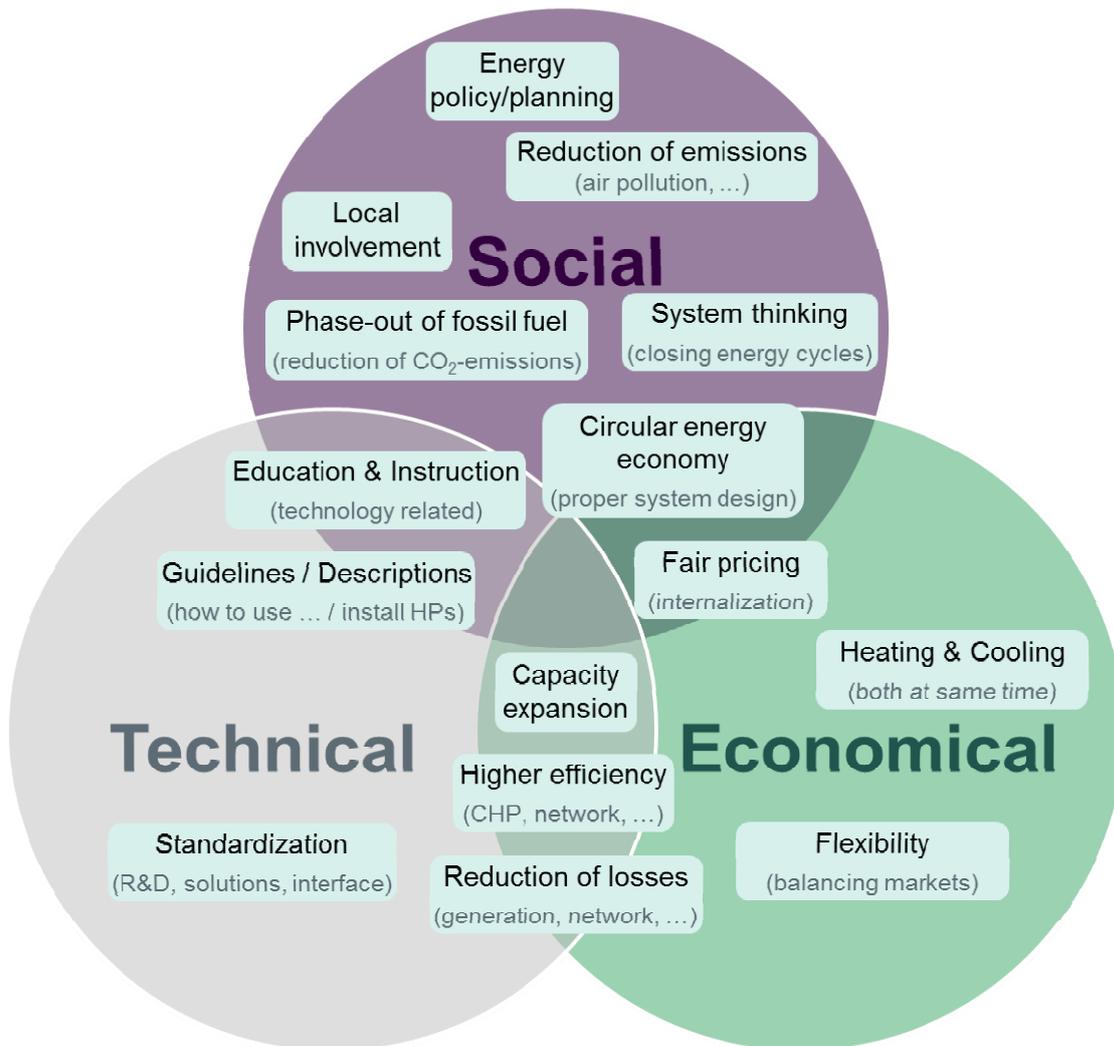


Abbildung 10: Darstellung von möglichen Ansätze zur Überwindung der Barrieren. [17]

6 Literaturverzeichnis

[1] Statistik Fernwärme Schweiz 2017

<https://www.fernwaerme-schweiz.ch/fernwaerme-deutsch/Verband/Jahresstatistik.php>

[2] Sres A. et al., *Weissbuch Fernwärme Schweiz – VFS Strategie*, eicher+pauli AG, Bern, März 2014

[3] Nussbaumer T. et al., *Planungshandbuch Fernwärme*, EnergieSchweiz, BFE, September 2018

[4] Angaben aus der Anbieter-Liste, VFS

<https://www.fernwaerme-schweiz.ch/fernwaerme-deutsch/allgemeine-Fragen/Fernwaerme-Anbieter.php>

[5] www.geneve-int.ch/de/das-projekt-geneve-lac-nations

[6] www.ewl-luzern.ch/privatkunden/energie/see-energie/

[7] <https://ajour.wwz.ch/circulago>

[8] <https://s.geo.admin.ch/82d8014435>

[9] Arpagaus, C.: *Hochtemperatur-Wärmepumpen: Marktübersicht, Stand der Technik und Anwendungspotenziale*, VDE-Verlag, Dezember 2018, 140 Seiten, ISBN 978-3-8007-4550-0

[10] Heizkostenvergleichsrechner, Hochschule Luzern

[11] Eurostat, Gaspreis und Strompreis.

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Natural_gas_price_statistics#Natural_gas_prices_for_household_consumers

[12] Statistik 2018, Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz

https://www.fws.ch/wp-content/uploads/2019/06/fws-statistiken-2018_V02.pdf

[13] Webseite Annex 47, Fallbeispiel «Öppen Fjärrvärme» Schweden,

<https://heatpumpingtechnologies.org/annex47/publications/>

[14] Trecco S. et al. *Entscheidungskriterien für die Systemwahl – Phase II*, BFE, September 2019

[15] <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/chemikalien/fachinformationen/chemikalien-bestimmungen-und-verfahren/kaeltemittel.html>

[16] Refrigerent Environmental Data, *Ozon depletion and Global Warming Potential*, Linde Gases

[17] Geyer R. et al., *Task 4: Implementation barriers, possibilities and solutions*, IEA Annex 47, Februar 2019