

Schlussbericht, 10. Dezember 2020

Programm «Thermische Netze»

Potenzial der Kälteversorgung bei bestehenden Fernwärmenetzen



energie schweiz

Unser Engagement: unsere Zukunft.

Versionennachweis

Version 1.0 5. Juli 2020

Version 2.0 18. November 2020

Autoren

Lukas Bühler, Ribuna AG

mit freundlicher Unterstützung durch

Prof. Joachim Ködel, Hochschule Luzern

Diego Hangartner, Hochschule Luzern

Matthias Abbühl, abbühl haustechnikplanung gmbh

Tobias Frei, E-Axiom GmbH

Gregor Feig, FAHRENHEIT GmbH

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: CH-3003 Bern

Infoline 0848 444 444, www.infoline.energieschweiz.ch

energieschweiz@bfe.admin.ch, www.energieschweiz.ch, twitter.com/energieschweiz

Inhalt

1	Einleitung	7
1.1	Ausgangslage	7
1.2	Zielsetzung	9
1.3	Abgrenzung	9
2	Grundlagen	10
2.1	Energiebedarf	10
2.2	Art der Kühlung	12
2.2.1	Grundsatz	12
2.2.2	Kompressionskältemaschinen	12
2.2.3	Ab- und Adsorptionskälteanlagen	13
2.2.4	Lüftungsanlagen	14
3	Chancenanalyse Kälteerzeugung	15
3.1	Nutzbare Betriebstemperaturen	15
3.2	Versorgung über bestehende Wärmenetze	16
3.2.1	Hochtemperaturnetz, 2-Leiter-Netz, mit einer dezentralen Sorptions-Kälteanlage	17
3.2.2	Hochtemperaturnetz, 3-Leiter-Netz, mit einer dezentralen Sorptions-Kälteanlage	18
3.2.3	4-Leiter-Netz mit zentralen Kälteerzeugung ab Quartierzentrale	19
3.2.4	Saisonaler Betrieb	22
3.3	Modulare Energieversorgungseinheiten	22
3.4	Nutzung der Rückkühlenergie	22
3.5	Auswirkung der Kältemaschine auf die Netztemperatur	23
4	Integration in sekundäre Haustechnik	24
4.1	Kühlung über Fussbodenheizung	25
4.2	Thermoaktive Bauteilsysteme TABS	25
4.3	Heizkörper	26
4.4	Deckenkühlelemente	27
5	Betriebskosten	28
5.1	Fall 1 – Quartierverbund, zentrale Energieerzeugung (zenKE4L)	29

5.2	Fall 2 – Mehrfamilienhaus, dezentrale Energieerzeugung (dezKE2L)	30
5.3	Fall 3 – Einfamilienhaus, dezentrale Energieerzeugung (dezKE2L)	31
6	Schlussfolgerung	32
7	Literaturverzeichnis	35
8	Abkürzungen	36

Zusammenfassung

Das Klima verändert sich und bewirkt tendenziell höhere Temperaturen. In den kommenden fünfzig Jahren wird in der Schweiz mit einer Erhöhung der Durchschnittstemperatur von 1,5 bis 2,5 K gerechnet. Diese Entwicklung erhöht gerade im Sommer den Bedarf und die Nachfrage nach Kühlung. Vorhandene Fernwärmeeinrichtungen könnten aufgrund ihrer vorhandenen Infrastruktur den Aufbau einer zusätzlichen Kälteversorgung begünstigen. Der Fokus der vorliegenden Arbeit bezieht sich dabei auf Fernwärmanlagen mit Betriebstemperaturen über 60°C. Gegenstand der Arbeit ist dabei die Erzielung einer Grundkühlung, möglichst unter Verwendung bereits vorhandener Einrichtungen. Eine umfängliche Kühlung der betreffenden Objekte (nach SIA 180) ist bei der vorliegenden Betrachtung nicht das unbedingte Ziel.

Während die Kälteerzeugung mittels Kompressionskältemaschinen die aktuell gängigste Methode ist um Raum zu kühlen kann im Falle von Netzen mit grossem Wärmeüberschuss auch die Anwendung von Sorptionstechniken erwogen werden, wobei eine Wärmeerzeugung und -verteilung zum Zweck der Kälteversorgung ökologisch nicht als erstrebenswert gilt.

Es werden Varianten aufgezeigt und gegenübergestellt, die bei 2-, 3-, 4-Leitersystemen den Einbezug eventueller dezentraler Sorptionskältemaschinen vorsehen. Wohlwissend, dass jeder zusätzlich zu installierende Leiter zu einem bestehenden Fernwärmenetz hohe Kosten verursachen kann, weist eine Lösung mit mehreren Leitern, gerade bei Neuerschliessungen, ein grosses Potenzial zur Mitversorgung des betreffenden Gebietes auch mit Kälte aus. Der Einbezug einer Quartier- oder Clusterlösung bietet sich für entsprechend geeignete Gebiete an.

Systeme mit Wechselbetrieb im Winter und Sommer (Winter = Beheizung, Sommer = Kühlung) bedingen die Implementierung einer dezentralen Trinkwarmwasserbereitung.

Zur Versorgung gerade von Regionen mit eher geringem Kältebedarf wird auf die Möglichkeit sogenannter modularer Energieversorgungseinheiten hingewiesen.

Die Besonderheit der bei Kühlung in erheblichem Masse anfallenden Rückkühlenergie und deren möglichst sinnvolle Nutzung ist aufgezeigt.

Mit mässig hohem Aufwand ist die Einbindung in die Gebäudetechnik beim Energiekunden möglich. Ziel ist dabei, möglichst viel von der bereits vorhandenen Installation wie Heizkörper, Deckenkühlelemente, TABs, Fussbodenheizungen zu nutzen. In jedem Fall muss eine Taupunktunterschreitung zur Vermeidung von Kondensatbildung verhindert werden.

Die errechneten Kosten für Kühlung bei Vorhandensein von Wärmenetzen sind als grobe Anhaltspunkte zu verstehen. Für jeden Anwendungsfall müssen die Gestehungskosten für Klimakälte individuell ermittelt werden. Sowohl dezentrale wie auch zentrale Kälteerzeugungseinrichtungen ermöglichen Gestehungskosten zwischen 20 und 30 Rp./kWh und können bei hohem Komfort preislich mit konventionellen Kühleinheiten mithalten.

Résumé

Le changement climatique implique une hausse des températures. Au cours des cinquante prochaines années, une augmentation de 1,5 à 2,5 K de la température moyenne est prévue en Suisse. Cette évolution accroît le besoin en refroidissement, surtout en été. Les installations de chauffage à distance existantes pourraient profiter de leur infrastructure existante pour élargir, outre le chauffage, l'offre en refroidissement. Cette étude se limite aux installations de chauffage à distance dont la température aller est supérieure à 60°C. Le but de cette étude est de définir des possibilités pour réaliser un refroidissement de base, si possible en utilisant des installations déjà existantes. Un refroidissement complet des objets concernés (selon la norme SIA 180) n'est pas contemplé.

Le refroidissement par compression est actuellement la méthode la plus courante pour refroidir les locaux, mais l'utilisation d'installations par sorption peut également être envisagée dans le cas de réseaux présentant un important excès de chaleur, bien que la production et la distribution en tant que telle de chaleur à des fins de refroidissement ne soient pas écologiquement souhaitables.

Des options qui prévoient d'éventuels refroidisseurs à sorption décentralisés dans des systèmes à 2, 3 et 4 tuyaux sont présentées et comparées. Sachant que chaque tuyau supplémentaire à installer dans un réseau de chauffage à distance existant peut entraîner des coûts élevés, une solution à plusieurs conducteurs, dès le départ, en particulier pour les nouveaux raccordements, présente un grand potentiel pour alimenter un quartier en refroidissement.

Les systèmes alternés (« change-over ») entre l'hiver et l'été (hiver = chauffage, été = refroidissement) nécessitent une installation décentralisée pour l'eau chaude sanitaire.

Cette étude analyse les unités d'approvisionnement en énergie modulaires, là où la demande de refroidissement est plutôt faible.

La chaleur fatale qui est générée dans une large mesure par le refroidissement, ainsi que sa possible utilisation, sont présentées.

L'intégration technique chez le client est possible avec un effort modéré. L'objectif est d'utiliser autant que possible les installations existantes telles que les radiateurs, les éléments de refroidissement au plafond, TABs et le chauffage au sol. Dans tous les cas, il est important d'empêcher la température de descendre en dessous du point de rosée afin d'éviter la condensation.

Les coûts calculés pour le refroidissement en présence de réseaux de chaleur doivent être interprétés comme un ordre de grandeur. Pour chaque besoin, les coûts de la climatisation doivent être déterminés individuellement. Les systèmes de refroidissement décentralisés et centralisés peuvent atteindre des coûts de production de 20 à 30 cts./kWh et peuvent concurrencer les unités de refroidissement conventionnelles en termes de prix en offrant un niveau de confort élevé.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Das globale Klima verändert sich und bewirkt durchschnittlich wärmere Temperaturen. Global betrachtet fällt die Veränderung geografisch unterschiedlich aus, wobei der Unterschied an den meisten Orten durch unterschiedlich starke Erwärmung geprägt ist.

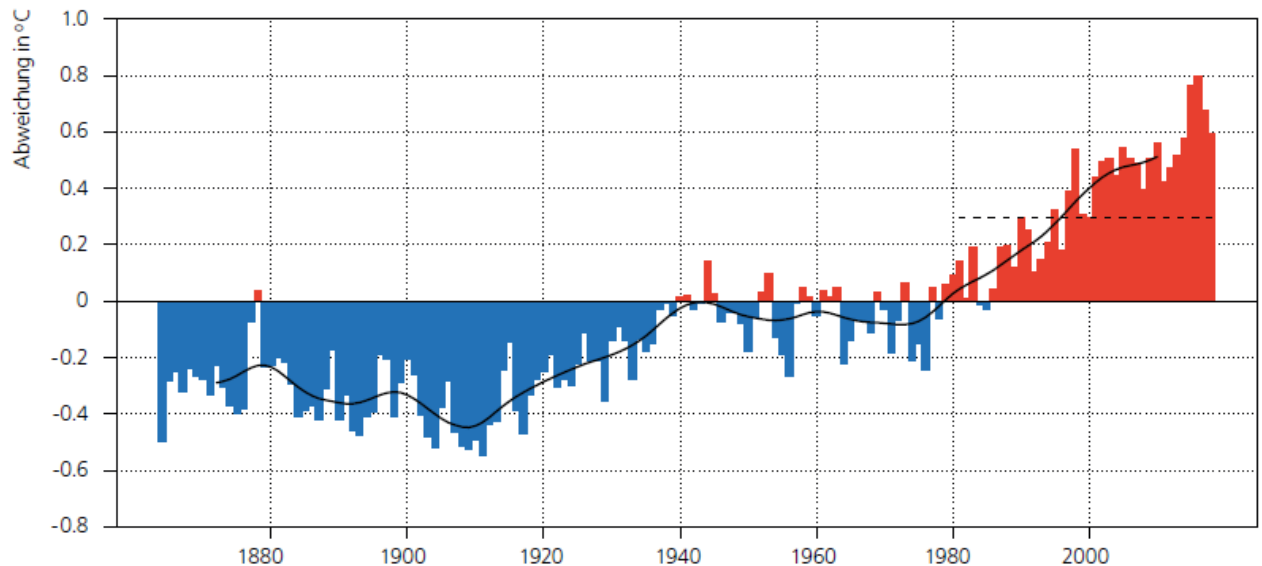


Abbildung 1: Langjähriger Verlauf der globalen Mitteltemperatur [1]

Diese Entwicklung gemäss Abbildung 1 erhöht im Sommer das Bedürfnis und damit die Nachfrage nach Kühlung. In der Schweiz sind Kühlsysteme im Prozessbereich (Detailhandel, Produktion, Industrie) bereits etabliert. Im Segment Wohnen und Arbeiten sind diese hingegen noch wenig verbreitet.

In der Schweiz zeigt sich der Trend der Erwärmung deutlich und in allen Landesteilen in ähnlichem Ausmass. Abbildung 2 zeigt einen Anstieg der durchschnittlichen Jahrestemperaturen von 0,35 – 0,59 °C pro Jahrzehnt (gemessen von 1981 – 2018).

Vergleicht man diese Werte mit dem Langzeitverlauf (Abbildung 1) ist eine Fortsetzung dieses Trends und damit eine steigende Nachfrage nach Klimakälte zu erwarten.

Trend Jahres-Temperatur [$^{\circ}\text{C}/\text{Dekade}$] 1981–2018

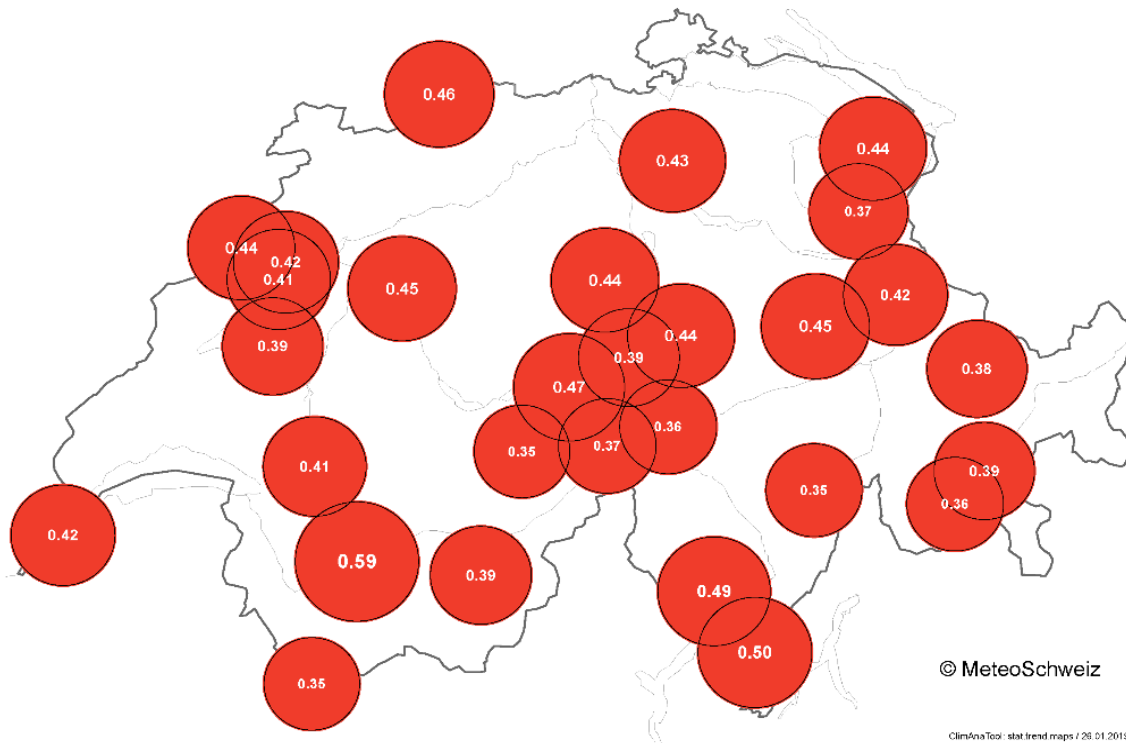
sign.: $p < 0.05$ 

Abbildung 2: Erhöhung Jahres-Temperatur / Dekade im Trend [2]

Durch die vorhandene Dichte an Fernwärmenetzen mit hohen Betriebstemperaturen im Siedlungsgebiet, bietet sich ggf. auch eine Nutzung dieser Energie zur Kühlung von Wohn- und Arbeitsräumen an. Dabei könnten Wärmegabesysteme der bestehenden Gebäudeinstallationen den Aufbau einer Kälteversorgungsstruktur begünstigen. Für die Energiedienstleister würde dies ein erweitertes Angebotssegment eröffnen, um ihren Energiekunden die Komfortkälte zu wirtschaftlichen Rahmenbedingungen anzubieten. Dabei liegt der Fokus auf der Nutzung der bestehenden Infrastruktur. Dies sowohl seitens Energiedienstleister (Wärmenetze $> 60^{\circ}\text{C}$) wie auch bei den Energiekunden (Gebäudeinstallationen, Gebäudehülle). Die Wirtschaftlichkeit der Rahmenbedingungen bezieht sich somit im Wesentlichen nicht auf den Energiepreis, sondern auf die Nutzung der bestehenden Installationen ohne grössere Investitionen.

Das Bedürfnis nach Komfortkühlung in der Schweiz wird sich trotz der Erwärmung der globalen Mitteltemperatur auf einige Wochen pro Jahr beschränken und bedeutet somit eine geringe Zahl an Jahresvolllaststunden. Kälteenergie bleibt damit zwangsläufig teuer. Für Energiedienstleister und Energiekunden bietet sich aber die Möglichkeit, die vorhandene Infrastruktur der Wärmeversorgung ebenso für die Kälteversorgung zu nutzen. In Quartieren mit Mischnutzung (Wohnen und Arbeiten) kann unter der Berücksichtigung der zeitlichen Verschiebung des Energiebedarfs mit tieferen Gleichzeitigkeiten dimensioniert werden.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Möglichkeiten der Kälteversorgung bei bestehenden Fernwärmenetzen zu untersuchen.

Der Fokus richtet sich dabei auf bestehende Fernwärmenetze mit einer Betriebstemperatur $> 60\text{ °C}$.

Ein weiterer Fokus liegt auf Lösungen für eine möglichst einfache Integration der Gebäudekühlung in die bestehende Installation der Gebäude. Dabei werden bzgl. Kühlleistung und Wirkungsgrad je nach System suboptimale Bedingungen in Kauf genommen. Es geht darum, ohne grösseren Eingriff in die Installation eine Grundkühlung der Wohn- und Arbeitsräume zu erreichen. Dabei muss nicht zwingend eine Regeltemperatur erreicht werden. Es kann genügen, die Raumtemperatur mit bestehenden Installationen (Fussbodenheizung, Verrohrung) um ein paar Kelvin zu senken.

1.3 Abgrenzung

Auf eine Untersuchung der Anergie- und Niedertemperaturnetze unter 60 °C wird verzichtet. Niedertemperaturnetze $< 20\text{ °C}$ treten im Bericht insofern in Erscheinung, da diese beim 4-Leiter-System bei einer zentralen, resp. semi-zentralen Kälteerzeugung als Transportnetz für die Kälte dienen. Vgl. dazu Details in Kap. 3.1.

Die untersuchten Techniken richten den Fokus auf den Bereich Wohnen. Geschäftsgebäude weisen oft eine individuelle Lösung zur Klimatisierung auf und werden infolgedessen nicht weiter untersucht.

Ein interessanter Ansatz wäre, das gesamte Fernwärmenetz im Sommer in ein Kühlnetz umzunutzen. In der Schweiz sind nur wenige thermische Netze, welche ausschliesslich Raumwärme anbieten und damit eine saisonale Betriebsumstellung ermöglichen, in Betrieb. Die Mehrheit der Netze bieten ganzjährig die Versorgung von Trinkwarmwasser an. Bei solchen Netzen müsste ein täglicher, resp. sogar mehrmals täglicher Wechselbetrieb gefahren werden. Dies ist aus betrieblichen sowie aus energetischen Gründen nicht sinnvoll. Der Aufwand, welcher für die jeweilige Umstellung betrieben werden müsste, sowie der Zeitbedarf für die Abkühlungsphase, ist zu gross.

Niedertemperaturnetze, welche diese Anforderung trotzdem erfüllen (nur Raumwärme ohne Trinkwarmwasser), könnten fallweise betrachtet und ggf. im saisonalen Wechselbetrieb gefahren werden. Im vorliegenden Bericht wird auf diese Lösung jedoch nicht weiter eingegangen.

2 Grundlagen

2.1 Energiebedarf

Das Bedürfnis nach Komfortkälte nimmt zu und gewinnt an Bedeutung. Dies wird vorwiegend beeinflusst durch die zunehmende Aussentemperatur, steigende Abwärme interner Wärmequellen und bessere Gebäudehüllen. Ausserdem hat das Nutzerverhalten auf die notwendige, künstliche Kühlleistung einen erheblichen Einfluss.

Als Komfortkühlung definiert die Norm SIA 180:2014 [3] 26.5 °C als obere Grenze für den Komfort. In dieser Studie legen wir 27 °C als die zu erreichenden Raumtemperatur fest um die gewünschte Behaglichkeit in den Wohnräumen sicher zu stellen.

Für die Kühlung von Arbeitsräumen ist eine tendenziell höhere Kühlleistung erforderlicher. Einerseits aufgrund der angestrebten Raumtemperatur und andererseits ist mit mehr technischer Abwärme und / oder einer höheren Dichte an Personen zu rechnen. Der aktuelle Kühlleistungsbedarf für Arbeitsräume liegt gegenüber Wohnflächen um ca. 15 - 20 W/m² höher.

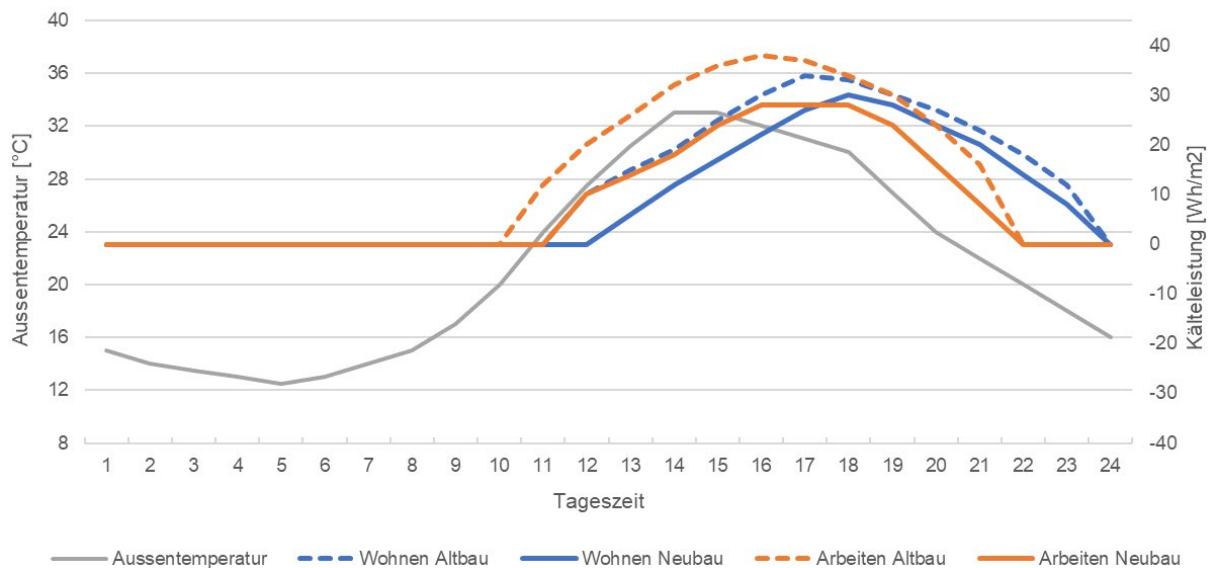


Abbildung 3: Kältebedarf während der Sommermonate, je nach Gebäudeart und Nutzung

Je nach Modell wird die jährliche Durchschnittstemperatur während den nächsten 50 Jahre um 1.5 – 2.5 Kelvin ansteigen. Damit nimmt nicht nur die erforderliche Leistung für die Kühlung, sondern auch die Anzahl der Volllaststunden zu. Einen grösseren Einfluss auf den effektiven Kühlleistungsbedarf hat jedoch der Zustand der Gebäudehülle, die Wirkung und Regelung von Beschattungssystemen und das Verhalten der Nutzer.

Der Bericht *Climabau* [4], erstellt durch eine Forschungsgruppe der Hochschule Luzern, zeigt die Entwicklung der empfundenen Temperatur für die Zeitspanne der Jahre 2004 bis 2063 nach Nutzergruppe auf.

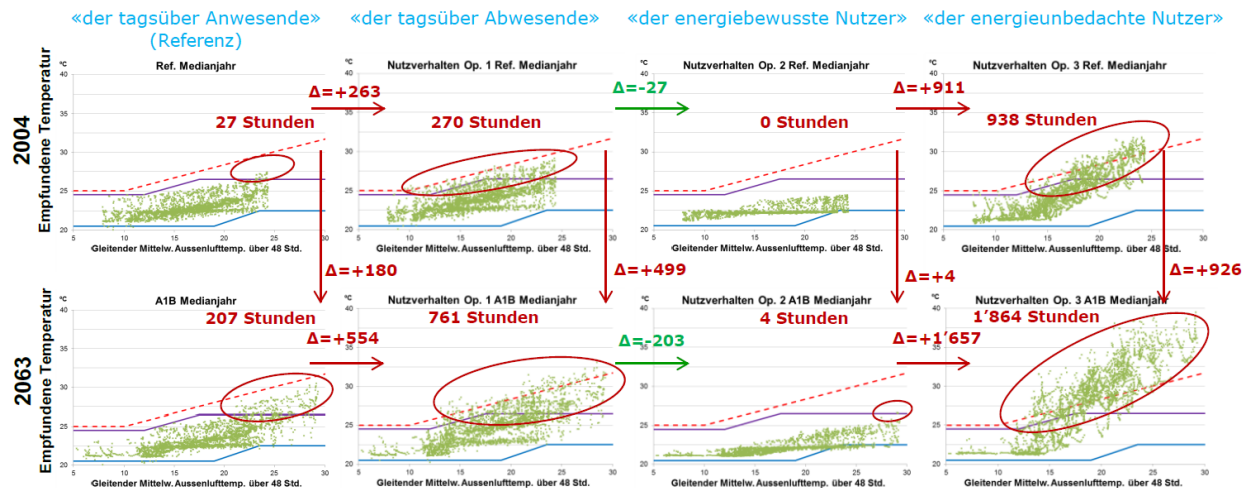


Abbildung 4: Veränderung Kühlbedarf 2004-2063 nach Nutzungsverhalten [4]

Basierend auf den Werten dieser Studie, wird pro durchschnittliche Haushaltsgrösse [5], folgender Leistungs- und Energiebedarf für die Berechnungen angenommen:

	Leistung	Energiebedarf
Jahr 2020	3 Kelvin über der Wohlfühltemperatur = 37 W/m ²	während 400 Stunden = 14.8 kWh/m ²
	Ø Haushalt 3.3 kW	Ø Haushalt 1'320 kWh/a
	8-Familien-Haus 18.5 kW	8-Familien-Haus 10'560 kWh/a
Jahr 2060	5 Kelvin über der Wohlfühltemperatur = 75 W/m ²	während 1'200 Stunden = 90 kWh/m ²
	Ø Haushalt 5.2 kW	Ø Haushalt 6'240 kWh/a
	8-Familien-Haus 30.8 kW	8-Familien-Haus 36'960 kWh/a

Zwischen Wohnnutzung und Gebäudeflächen, die zum Arbeiten dienen, ist eine zeitliche Verschiebung zu erwarten. Die Kühlleistung im Bereich Arbeiten wird tendenziell früher am Tag und mit etwas höheren Leistungen, insbesondere durch Wärmeabgabe von technischen Geräten und von mehr Personen pro Fläche, anfallen. Gegen Abend nimmt die Kühlleistung gegenüber der Nutzung Wohnen jedoch früher ab. Die Kühlleistung in den Abendstunden ist vorwiegend von der Jahreszeit abhängig. Eine natürliche Lüftung / Kühlung verzögert sich im Hochsommer und macht somit eine künstliche Kühlung bei Wohnnutzung am Abend notwendig.

2.2 Art der Kühlung

2.2.1 Grundsatz

Dieser Bericht befasst sich hauptsächlich mit der Komfortkühlung im Bereich Wohnen. Nicht näher betrachtet wird der Bereich Prozesskälte, da dieser situationsbezogen pro Objekt stark variiert und somit individuell geplant wird.

2.2.2 Kompressionskältemaschinen

Die Erzeugung von Kälte mittels Kompressionskältemaschinen ist aktuell die gängigste Methode, um Wohn- und Arbeitsräume zu kühlen. Diese Anlagen können als Mono-Block oder als Split-Geräte eingesetzt werden. Die zugeführte Energie ist elektrisch und die Abwärme wird in den meisten Fällen – sofern keine Nutzungsmöglichkeit im Gebäude besteht – an die Umwelt abgegeben.

Alternativ könnte die Energie dezentral zur Vorwärmung des Trinkwarmwassers genutzt werden. Ideal wäre eine Rückführung über das Fernwärmenetz zur Heizzentrale, um die Energie dort zu speichern oder zu nutzen.

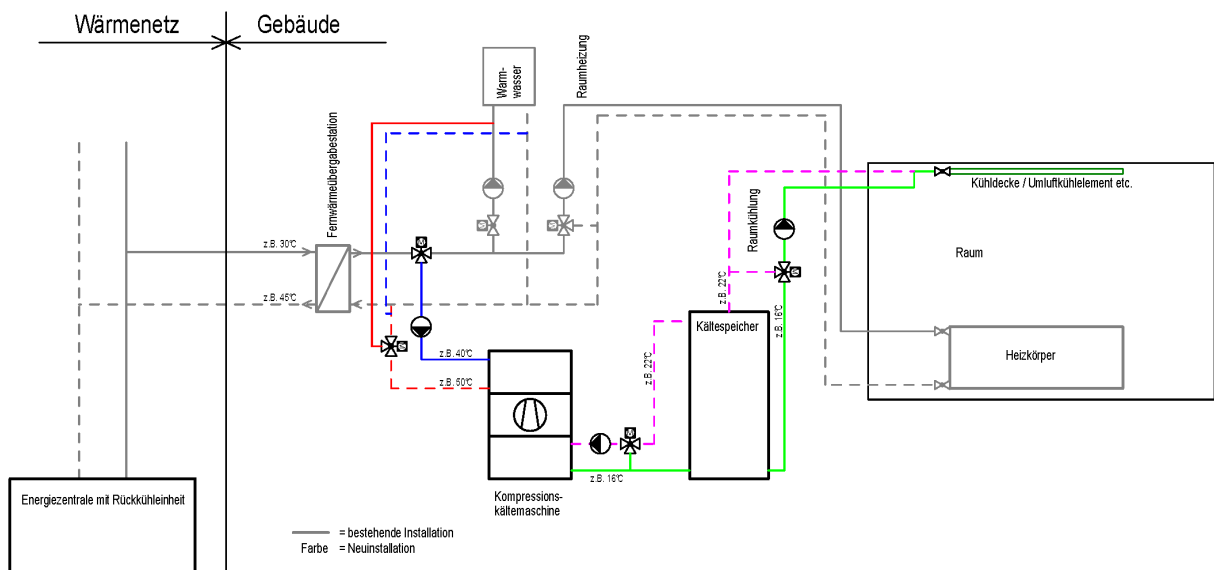


Abbildung 5: Schema Kompressionskälte mit Ableitung Rückkühlenergie in Heizzentrale

2.2.3 Ab- und Adsorptionskälteanlagen

Mit dem vorliegenden Bericht soll das Potenzial zur Gebäudekühlung mit bestehenden Wärmenetzen untersucht werden.

Beste Voraussetzungen dazu bieten Wärmenetze mit massivem Wärmeüberschuss auf der Primärproduktion wie Abwärme aus einer Kehrlichtverbrennungsanlage (KVA). Auch bei Wärmenetzen, welche mit erneuerbaren Energieträgern betrieben werden (Biomasse) kann ein Kälteangebot bzgl. der CO₂ Bilanz gegenüber einer elektrisch betriebenen Kompressionskälteanlage Sinn machen. Falls die Wärmeenergie jedoch nur für die Kühlleistung erzeugt wird, muss dies ökologisch und ökonomisch im Einzelfall geprüft werden.

Bei Kühltechniken mit Wärme als Energieträger steht die Ab- und Adsorptionstechnik im Vordergrund.

Bei der Adsorptionstechnik [6] erfolgt die Sorption¹ über Feststoffe, in der Regel Silikagel oder Zeolith. Diese Anlagen sind in kompakter Bauweise erhältlich und zeigen bei niedrigeren Temperaturen einen guten Wirkungsgrad auf.

Absorptionskältemaschinen [7] kommen bei höheren Vorlauftemperaturen zum Einsatz und werden mit Flüssigkeiten (i.d.R. Ammoniak oder Lithium-Bromid) betrieben. Diese Bauart ist die aktuell verbreitetere Methode.

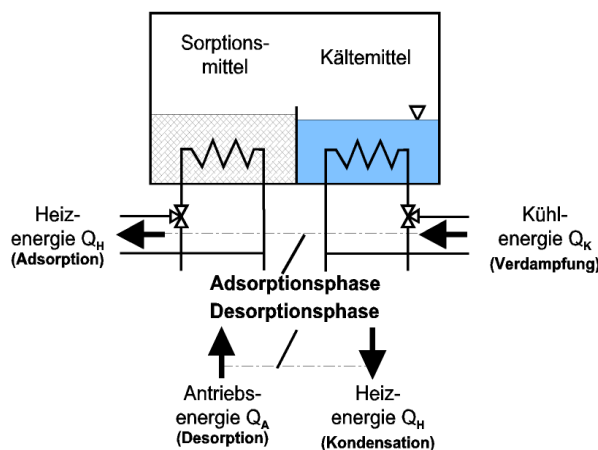


Abbildung 6: Prinzipschema Adsorption

Quelle: Famulus via Wikipedia (freie Lizenz)

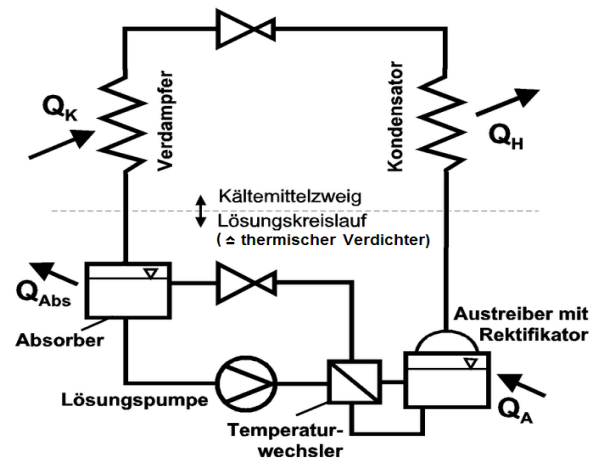


Abbildung 7: Prinzipschema Absorption

Quelle: Famulus via Wikipedia (freie Lizenz)

¹ Sorption ist eine Sammelbezeichnung für Vorgänge, die zu einer Anreicherung eines Stoffes innerhalb einer Phase oder auf einer Grenzfläche zwischen zwei Phasen führen. Die Anreicherung innerhalb einer Phase nennt man genauer Absorption, die an der Grenzfläche Adsorption. James William McBain führte 1909 den Oberbegriff Sorption für Prozesse ein, bei denen nicht eindeutig zwischen Ad- und Absorption unterschieden werden kann [5].

Die Kühlung in den Räumen erfolgt idealerweise über Kühldecken- oder Umluftkühlelemente. Wie bei allen weiteren Kühltechnologien ist dies die effizienteste und bezüglich Behaglichkeit die angenehmste Art den Räumen die Wärmeenergie zu entziehen. Eine Raumkühlung über Heizkörper oder Bodenheizung ist bzgl. der möglichen Leistung und der Regelbarkeit beschränkt. Eine detaillierte Beschreibung der Kälteverteilung erfolgt in Kapitel 4.

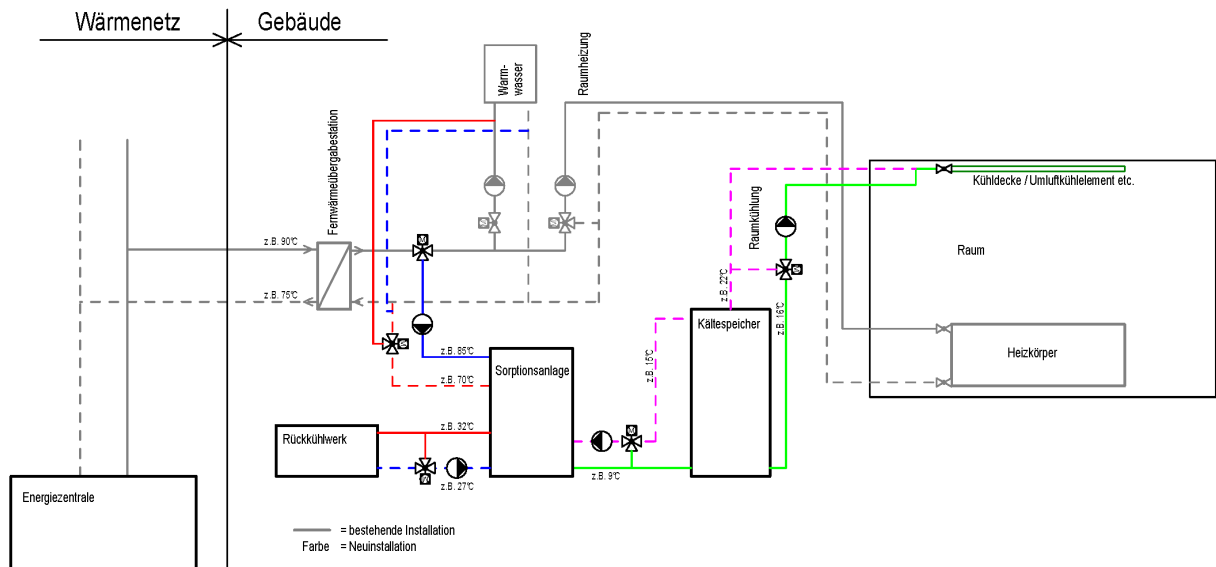


Abbildung 8: Schema Sorptionsanlage mit Kältespeicher

2.2.4 Lüftungsanlagen

Verfügt ein Gebäude über eine Lüftungsanlage, erfolgt die Kühlung idealerweise über das Lüftungssystem. Diese Art der Kühlung ist effizient und lässt sich einfach steuern. Im vorliegenden Bericht wird deshalb nur die Klimatisierung von bestehenden Gebäuden ohne Lüftungsanlagen untersucht.

3 Chancenanalyse Kälteerzeugung

3.1 Nutzbare Betriebstemperaturen

Der Temperaturbereich zwischen 20 °C – 60 °C lässt sich für die Kühlung nicht nutzen. Für Free-Cooling ist dieser Bereich zu hoch und für die Sorptionsanlagen zu niedrig. Bei der Wärmeversorgung dienen diese Netze in diesem Temperaturbereich der Raumwärme ohne Trinkwarmwasser-aufbereitung, resp. mit zusätzlicher dezentraler Energiezufuhr für das Trinkwarmwasser (TWW).

Bei niedrig temperierten Verteilsystemen (< 60 °C) muss das Trinkwarmwasser dezentral erzeugt bzw. nacherwärmt werden. Dies kann je nach System pro Gebäude oder pro Wohneinheit, ggf. sogar pro Raumeinheit, erfolgen. Beim TWW ist auf eine genügend hohe Temperatur in den Leitungen zu achten.

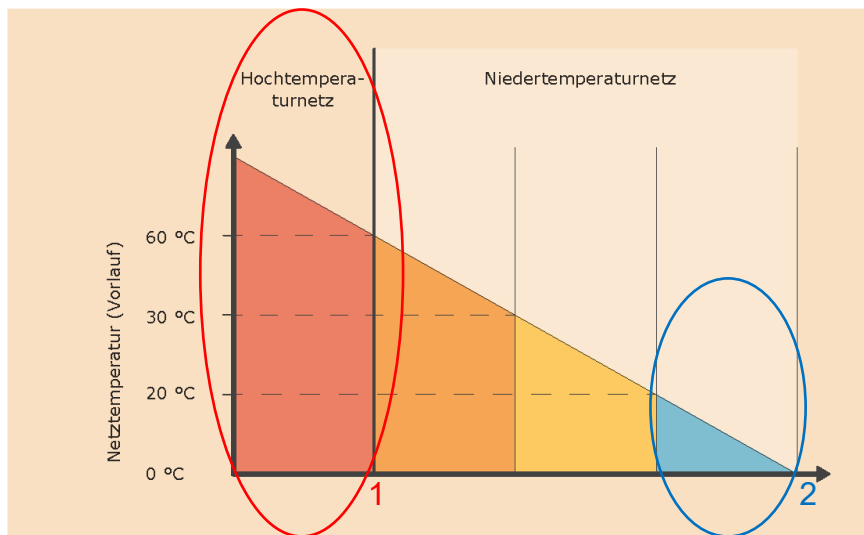


Abbildung 9: Grafik Unterteilung von thermischen Netzen [8]

Die technisch machbare Kälteerzeugung mit Hochtemperatur-Fernwärmenetzen als Energielieferant ist die Sorptionstechnik (vgl. Kapitel 2.2.3). In diesem Prozess entsteht auch Wärme, welche genutzt werden kann oder an die Umwelt abgegeben werden muss.

Wird die Sorptionstechnik dezentral, also beim Energiekunden eingesetzt, muss diese Rückkühlung ebenfalls dezentral erfolgen. Dazu müsste die Temperatur der Rückkühlung mittels Wärmepumpe auf eine nutzbare Temperatur gebracht werden. Diese Investition hierfür wäre sehr fraglich aufgrund der Tatsache, da dieses Energieangebot nur an heißen Sommertagen anfallen würde.

Die Möglichkeit der Nutzung der Rückkühlenergie bietet sich allenfalls bei einer zentralen Kälteerzeugung oder Quartier-Kälteversorgung. Je nach Rahmenbedingungen könnte überschüssige Rückkühlenergie über einen Wärmespeicher zur Nutzung in einer anderen Periode (saisonale Speicherung) eingelagert werden.

3.2 Versorgung über bestehende Wärmenetze

Um das Energiedienstleistungsangebot in bestehenden Fernwärmenetzen um Komfortkälte zu erweitern, muss möglichst die bestehende Infrastruktur als Basis genutzt, und nur mit den, für die Kühlung notwendigen Komponenten erweitert werden.

Dabei ist bei der Auswahl des Systems entscheidend, ob die Wärmeversorgungsinfrastruktur bis zum Energiekunden vorhanden ist, oder ob die Energieversorgung ein Quartier neu erschliesst. Letzteres gilt analog, wenn die Fernwärmeleitungen erweitert, resp. erneuert werden können.

Zusätzlich notwendige Leiter lösen höhere Investitionskosten aus. Diese Investition macht Sinn, wenn damit die Gesamtwirtschaftlichkeit des Energieversorgungssystems (Heizen + Kühlen), über das gesamte Jahr gerechnet, erhöht werden kann.

- die Möglichkeit zum Energiemanagement mit Nutzung der Rückkühlenergie aus der Kälteerzeugung mit Wärmespeicher besteht.
- eine effizientere Kältemaschine zur Steigerung des Wirkungsgrades resultiert.
- dadurch deutlich reduzierte Installationen bei den Energiebezüglern notwendig werden, insbesondere bzgl. Rückkühlung.
- durch die Nutzung einer geringeren gleichzeitig eine Verringerung der notwendigen Gesamtinstallation resultiert.

Nachstehend werden folgende Optionen untersucht:

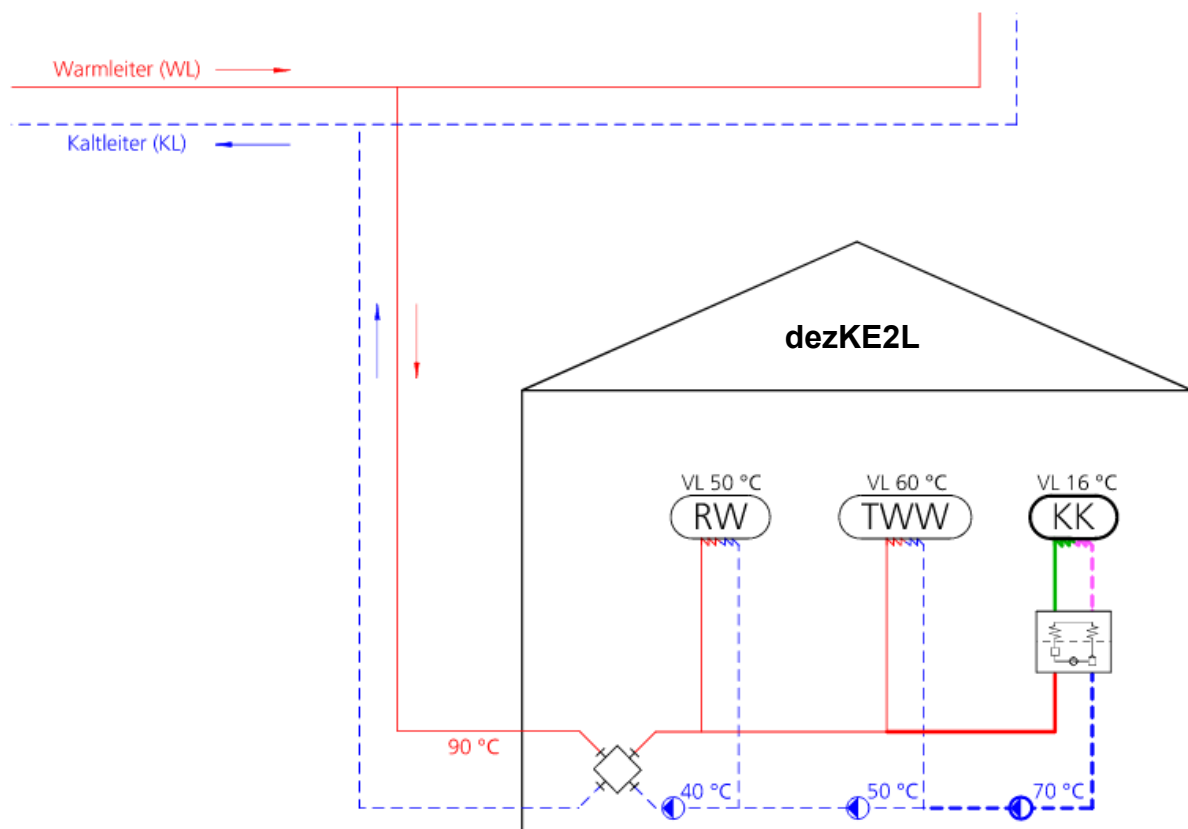
- 1 Bestehendes Hochtemperaturnetz > 60 °C
 - a) mit einer dezentralen Sorptionskältemaschine ab 2-Leiter-Netz (dezKE2L)
 - b) mit einer dezentralen Sorptionskältemaschine ab 3-Leiter-Netz (dezKE3L)
- 2 Neues (zusätzliches) Kaltwassernetz < 20 °C
 - a) mit zentraler Kälteerzeugung und zusätzlichen Kaltwasserleiter (zenKE4L)

Weitere Optionen wie ein saisonaler Betrieb über ein bestehendes 2-Leiter-Netz (zenKE2L) sowie die Idee von modularen Energieversorgungseinheiten wurden betrachtet.

3.2.1 Hochtemperaturnetz, 2-Leiter-Netz, mit einer dezentralen Sorptions-Kälteanlage

Ein 2-Leiter-Netz wird im Hochtemperaturbereich mit Betriebstemperaturen VL 60 °C - 100 °C, RL 45 °C - 60 °C, betrieben. Im Sommer dient diese Versorgung vorwiegend für die TWW Aufbereitung.

Mittels der Sorptionskältemaschine lässt sich die benötigte Kälteleistung durch Nutzung der zugeführten Wärmeenergie aus dem Fernwärmenetz direkt vor Ort erzeugen. Diese Option bietet sich bei bestehenden Fernwärmenetzen an, bei welchen die Zuleitungen vorgegeben und nicht erweitert werden können.



Legende:

RW	Raumwärme
TWW	Warmwasser
KK	Klimakälte
	Pumpe
	Wärmetauscher Unterstation
	Sorptionsmaschine
	Wärme / Kälteabgabe

Abbildung 10: Grafik 2-Leiternetz mit dezentraler Sorptions-Kälteanlage

3.2.2 Hochtemperaturnetz, 3-Leiter-Netz, mit einer dezentralen Sorptions-Kälteanlage

Beim 3-Leiter-Netz wird ein zusätzlicher Vorlauf aus der Rücklaufleitung zum Energiebezüger geführt. Dieser kann für die Niedertemperatur-Raumwärme genutzt und damit die Rücklauftemperatur im Verteilnetz gesenkt werden. Für die Kälteversorgung ist der dritte Leiter nicht nutzbar.

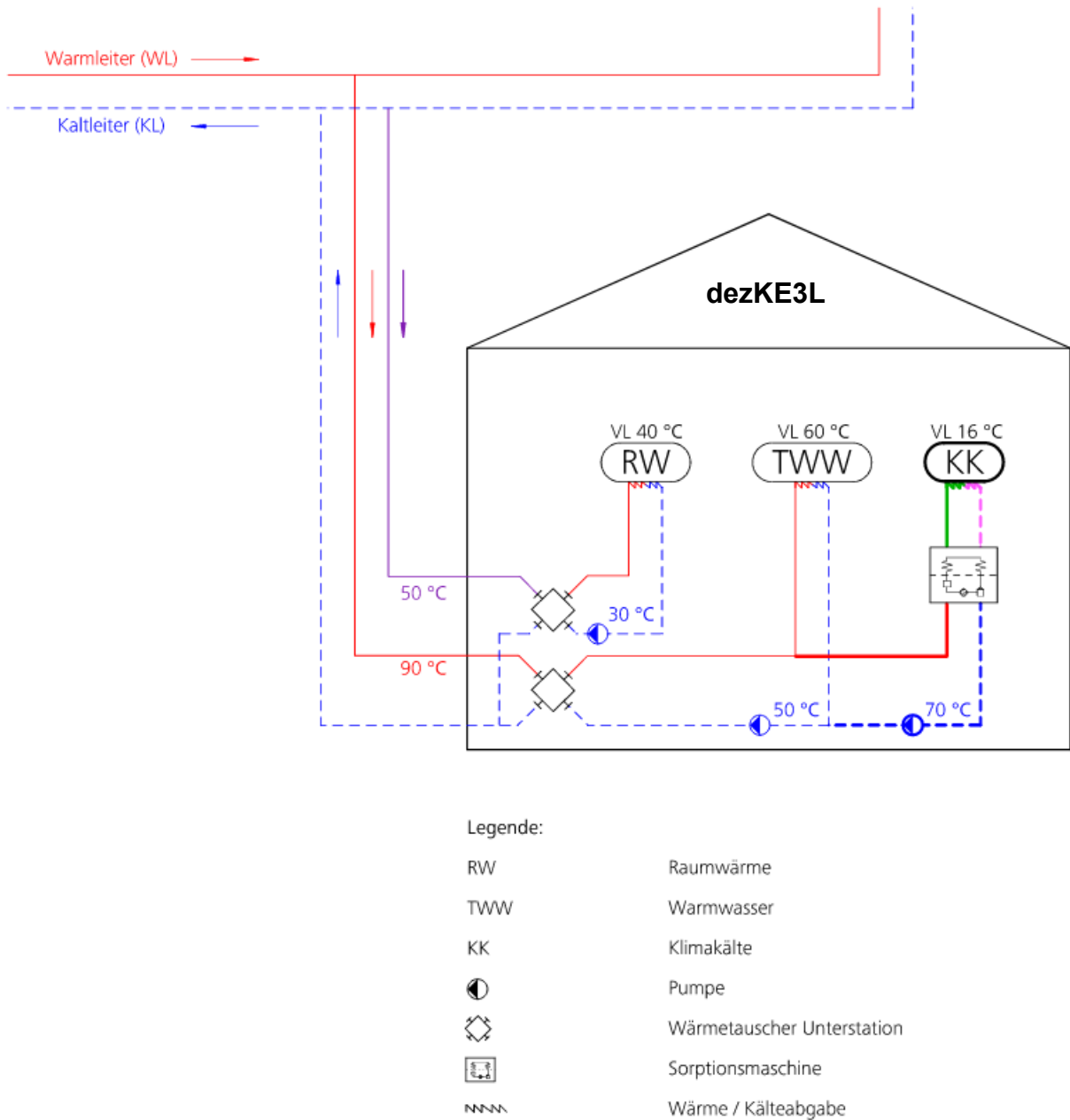


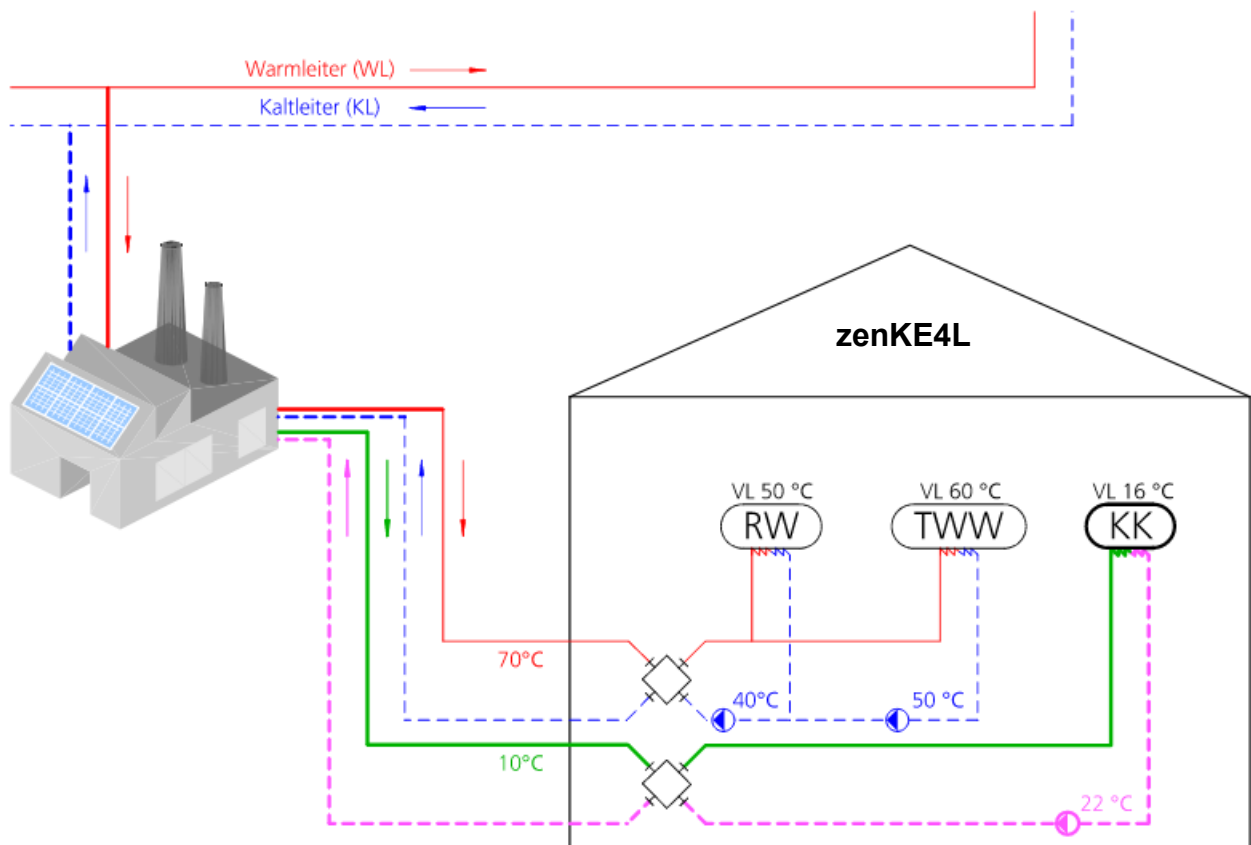
Abbildung 11: Grafik 3-Leiternetz mit dezentraler Sorptions-Kälteanlage

3.2.3 4-Leiter-Netz mit zentraler Kälteerzeugung ab Quartierzentrale

Das Verteilnetz

Ein 4-Leiter-Netz ist die ideale, resp. notwendige Energietransportinfrastruktur, wenn sowohl die Wärme- wie auch die Kühlleistung zentral erzeugt wird. Die zentrale Anlage kann unterschiedliche Cluster versorgen (Gesamtnetz, Quartiere / Ortsteile, Überbauungen).

Mit dem 4-Leiter-Netz kann ganzjährig Energie für die TWW Aufbereitung aus der zentralen Energieerzeugung angeboten werden.



Legende:

RW	Raumwärme
TWW	Warmwasser
KK	Klimakälte
	Pumpe
	Wärmetauscher Unterstation
	Sorptionsmaschine
	Wärme / Kälteabgabe

Abbildung 12: Grafik zentrale Kälteerzeugung mit 4-Leiternetz

Die Quartierzentrale

Die Nutzung erneuerbar erzeugter Wärmeenergie, oder Abwärme aus anderen Prozessen zur Kühlung bietet grosses Potenzial. Die dazu notwendige Technik ist die Sorption. Diese Maschinen verursachen Investitionskosten, welche sich für kleinere Gebäudeeinheiten nur schwer amortisieren lassen. Ausserdem fällt Rückkühlenergie an, welche genutzt werden kann.

Effiziente und wirtschaftliche Anlagen müssen somit eine minimale Leistung aufweisen. Die Sorptionstechnik wird sich weiterentwickeln und damit auch die Angebotsvielfalt im Markt. Aktuell ist diese noch eher spärlich und die Kosten entsprechend hoch.

Eine Quartier-(Cluster)Lösung bietet für eine ganzheitliche Energieversorgung beste Voraussetzungen. Dabei muss unterschieden werden ob die Energiekunden bereits an ein Fernwärmenetz angeschlossen sind, oder ob ein Quartier neu erschlossen wird. Je nach Ausgangslage bieten sich folgende Handlungsoptionen:

- Wärmenetz vorhanden
 - a) Saisonaler Betrieb ab Quartierzentrale
 - b) zusätzliche Kaltleiter für Kühlung ab Quartierzentrale
- Neuerschliessung
 - a) 4-Leiter-Netz ab Quartierzentrale

Bei der Quartierzentrale selbst kann nebst Aufbereitung der Kühlleistung mittels Sorption zusätzlich Hilfsenergie mittels PV-Anlage erzeugt und die Rückkühlenergie mittels Erdspeicher bewirtschaftet werden.

Nachstehende Grafik zeigt ein mögliches System für eine Quartierschliessung mit optimiertem Energiemanagement.

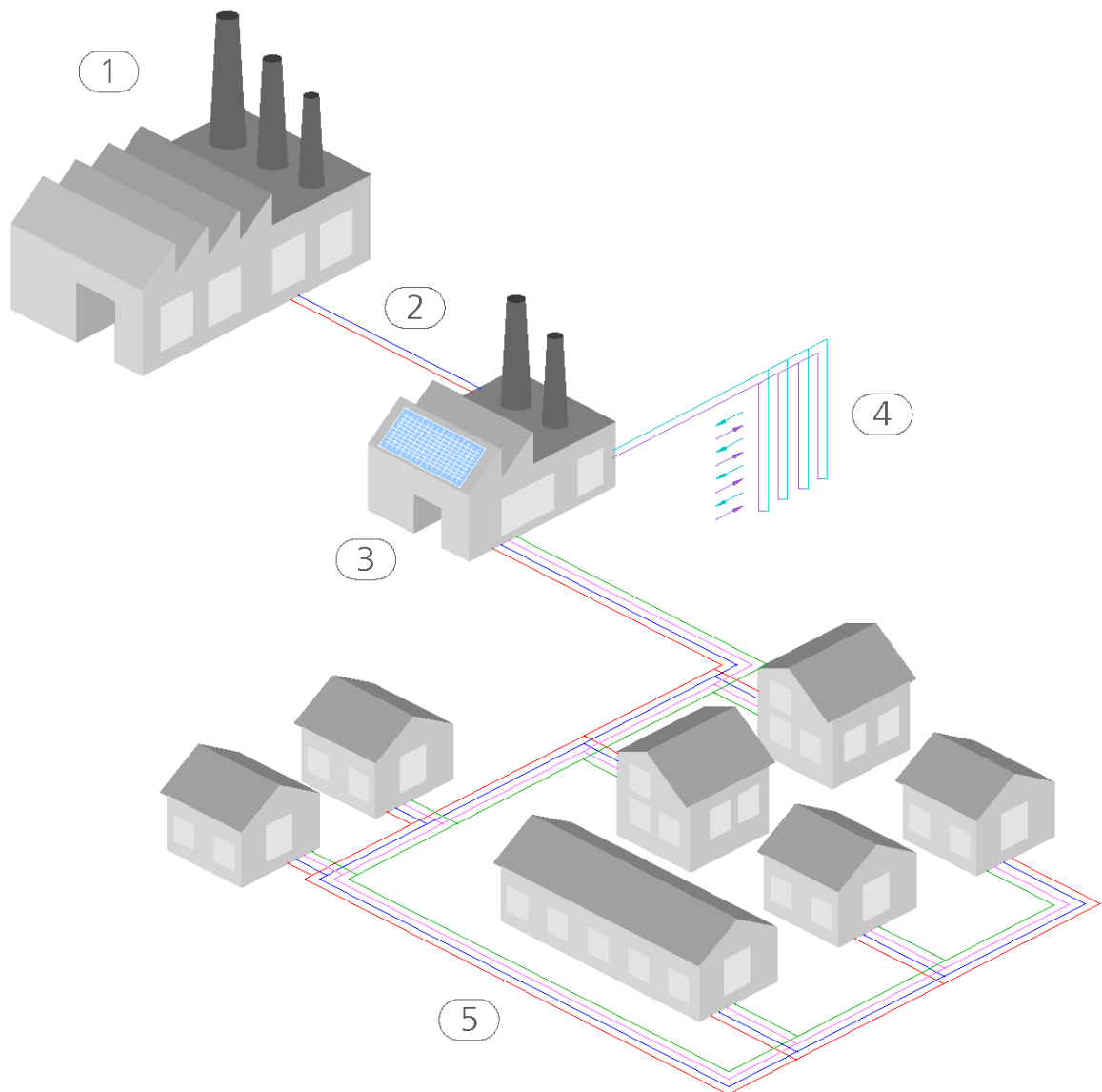


Abbildung 13: Clusternetz mit Wärme- und Kälteversorgung ab Quartierzentrale

1 Heizzentrale

Erzeugung der Heizenergie für den Winterbetrieb und die Warmwasseraufbereitung.

2 Fernwärmenetz

3 Clusterzentrale

Quartierzentrale mit installierter Kältemaschine, Nutzung der Rückkühlenergie mit Erdspeicher und Erzeugung der elektrischen Hilfsenergie über Photovoltaikanlage zur Senkung der Energiekosten.

4 Erdspeicher

5 4-Leiter-Netz

Wärmenetz: Vorlauf ca. 85 °C, Rücklauf ca. 55 °C

Kältenetz: Vorlauf 10 °C, Rücklauf 20 °C

3.2.4 Saisonaler Betrieb

Eine weitere Option, mit einem 2-Leiter-Netz als Basis, ist der saisonale Wechsel von Heiz- (Winter/Übergangszeit) auf Kühlbetrieb (Sommer). Im Winter werden die Leiter für die Wärmeversorgung (RW + TWW) genutzt. Im Sommer wird der Vorlauf zum Kaltleiter Kühlung und der Rücklauf zum Warmleiter Kühlung. In der Energiezentrale wird die zugeführte Energie in den Erdspeicher geleitet. Die gespeicherte Energie wird im Winter wieder zur Vorwärmung des Vorlaufes genutzt. In diesem Betriebsmodell muss die TWW-Aufbereitung dezentral mittels Wärmepumpe gelöst werden.

3.3 Modulare Energieversorgungseinheiten

Eine interessante Versorgungsvariante wäre der Einsatz von modularen Energieversorgungseinheiten. Beim Energiekunden wird ein Kältetauscher installiert, welcher die Kälteleistung aus einem modularen Energieelement bezieht. Die Rückkühlenergie wird in einem zweiten Modul gespeichert. Sobald das Kühlmodul «leer», resp. das Wärmespeichermodul «voll» ist, werden die Module ausgetauscht und in der Energiezentrale des Energiedienstleisters wiederaufbereitet.

Insbesondere für Energiekunden mit eher geringem Kältebedarf wäre ein solches Angebot interessant. Da das Heizsystem für den Wärmeentzug in den Räumen genutzt wird, kann damit das gesamte Haus oder die Wohnung um wenige Kelvin gekühlt werden. Dies ohne grössere Installationen im Gebäude.

Aktuell sind solche Module auf dem Markt noch nicht erhältlich. Es werden jedoch bereits ähnliche Systeme verwendet, welche laufend weiterentwickelt werden. Im Einsatz stehende Systeme kommt beispielsweise bei der Notkühlung von technischen Installationen, wie Serveranlagen, zur Anwendung. Diese Notkühlanlagen verfügen über einen kurzfristig einmal nutzbaren Kühlbooster, welcher die Kühlenergie liefert bis ein System kontrolliert heruntergefahren oder die Hauptkühlung repariert werden kann.

Durch die Befragung von Marktanbieter bzgl. der Weiterentwicklung solcher Module kann festgestellt werden, dass das Potenzial von solchen modularen Kühlanlagen vorhanden ist. Infolgedessen werden auch die Entwicklung und Forschung in diese Richtung gehen.

3.4 Nutzung der Rückkühlenergie

Mit der Kühlung der Wohn- und Arbeitsräume entsteht eine erhebliche Energiemenge, welche in vielen Fällen nicht genutzt werden kann. Deshalb wird die Rückkühlwärme an die Umwelt abgegeben. Dies ist insbesondere bei Kompressionskältemaschinen sowie bei Sorptionsmaschinen der Fall.

Ist die Kühlmaschine dezentral beim Endkunden, ist eine sinnvolle Nutzung höchstens bei der Vorwärmung des TWW möglich. Diese Nutzung (wenn nur zu diesem Zweck eingesetzt) löst jedoch verhältnismässig hohe Investitionen aus.

Kann die Energie über einen Leiter zur Energiezentrale rückgeführt und dort gespeichert werden, kann die Wärme im Winter wieder genutzt werden. Die Speicherung erfolgt am effizientesten über einen Erdspeicher.

3.5 Auswirkung der Kältemaschine auf die Netztemperatur

Der Einsatz einer dezentralen Sorptions-Kältemaschine ist mit einem Anstieg der Rücklauftemperatur verbunden, da die verfügbaren Maschinentypen Temperaturen um die 70 °C zurückspeisen. Die Temperaturspreizung reduziert sich somit im Kühlbetrieb und macht ein höheres Umwälzvolume notwendig. Mit dem allgemein geringeren Energiebedarf im Sommer dürfte dies hydraulisch zu bewältigen sein. Dies sollte jedoch in der Netzhydraulik projektbezogen überprüft werden.

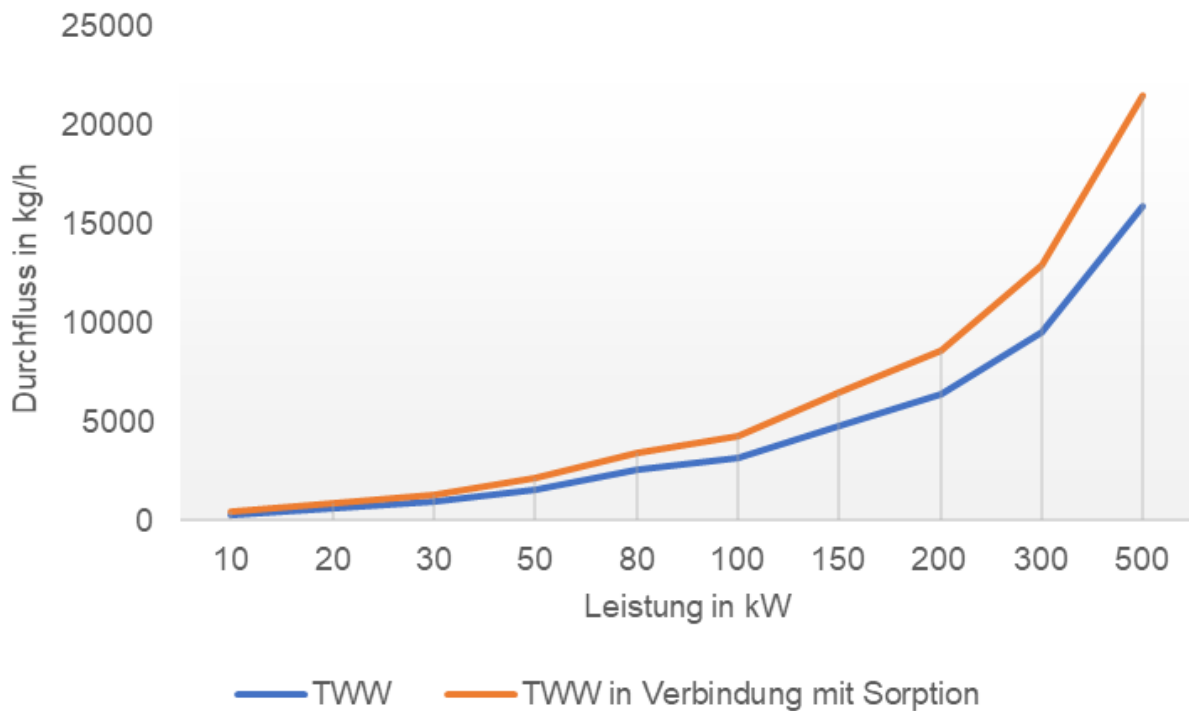


Abbildung 14: Grafik Zunahme Durchflussmenge für Energieversorgung TWW in Verbindung mit Sorption

In Abbildung 14 kann festgestellt werden, dass die Durchflussmenge bei einer Energieversorgung für TWW in Verbindung mit Sorption gegenüber einer reinen Energieversorgung für TWW deutlich zunimmt. Dies ist auf die Erhöhung der Rücklauftemperatur zurückzuführen.

Da der Leistungsbedarf im Sommer abnimmt sollte dies jedoch hydraulisch unproblematisch sein.

4 Integration in sekundäre Haustechnik

Massgebend für das mögliche Angebot und die notwendigen Installationen beim Energiekunden ist die Betriebstemperatur des Energienetzes. Können genügend hohe Vorlauftemperaturen für den Betrieb einer Sorptionsanlagen bereitgestellt und die Erhöhung der Rücklauftemperatur hydraulisch gelöst werden, kann die Kälteerzeugung dezentral gelöst werden. Dies ist meist nur bei grösserem Leistungsbedarf sinnvoll.

Besser wird ein Energienetz erweitert oder neu erstellt, und als 4-Leiter-Netz betrieben. Dies macht beim Energiekunden nur die Einbindung in die sekundärseitige Anlage notwendig.

Auch beim Energiekunden ist das Ziel, möglichst viel der bereits vorhandenen Installation zu nutzen, und die Wohn- und Arbeitsräume mit einer geringen Anpassung zu kühlen. Dies kann beispielsweise über die bestehende Heizungsanlage erfolgen. Das kalte Wasser wird dabei durch die Anlage geleitet und kann so den Räumen Wärme entziehen. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass keine Kondensation an den Leitelementen (Rohren / Heizkörper etc.) entsteht. Dies ist bei einer Vorlauftemperatur von ca. 16 °C in der Regel noch gewährleistet. Die Temperaturspreizung ist bei Kühlbetrieb gering, was grosse Umwälzmengen bewirkt.

Grundsätzlich kann jedes Wärmeverteilsystem auch als Kühlsystem genutzt werden. Die wesentliche Herausforderung bildet dabei die Regelung und die Umschaltung zwischen Heizen und Kühlen. Bei bestehenden Wärmeverteilsystemen muss zuerst beurteilt werden, ob die Regeleinheit für den Kühlfall eingesetzt oder erweitert werden kann (Gruppen- und Zonenregelung, Taupunktregelung etc.). Ist dies der Fall, kann mit verhältnismässig geringem Aufwand das bestehende Verteilsystem an die Kälteerzeugung angeschlossen werden. Ist dies nicht möglich, muss eine Regeleinheit für die Kälteversorgung aufgebaut werden. Dies beinhaltet auch eine Pumpengruppe, welche in das bestehende Verteilsystem eingebunden wird. Die Raumregelung muss auf den Kühlfall angepasst werden, z.B. durch den Einsatz von Raumfühlern und Stellantrieben für Heiz- und Kühlanwendungen.

Die Taupunktregelung ist vor allem beim Kühlen über Heizkörper, Deckenstrahlplatten, Deckensegel - sichtbare Elemente – wichtig. Damit wird die Vorlauftemperatur so geregelt, dass an den Kühlflächen keine Kondensatabscheidung der Raumluft auftreten kann. Durch einen Feuchtefühler im Raum können die Betriebstemperaturen optimiert und ausgereizt werden.

Nachstehend werden folgende Optionen der Raumkühlung betrachtet:

- 1 Kühlung über Fussbodenheizung
- 2 Kühlung über Thermoaktive Bauteilsysteme TABS
- 3 Kühlung über Heizkörper
- 4 Kühlung über Deckenkühlelemente

4.1 Kühlung über Fussbodenheizung

Ein konventionelles Fussbodenheizungssystem kann zur Kühlung der Räume eingesetzt werden. Die Kühlwirkung ist stark vom Bodenaufbau und vom Bodenbelag abhängig. Eine merkbare Kühlwirkung kann nur erzielt werden, wenn die Fussbodenheizungsrohre im Unterlagsboden verlegt sind. Bodenbeläge weisen stark unterschiedliche Wärmedurchlasswiderstände auf, was auf die Kühlleistung direkt Einfluss hat.

Mögliche Kühlleistung über Fussbodenheizung: 15 - 20 W/m²

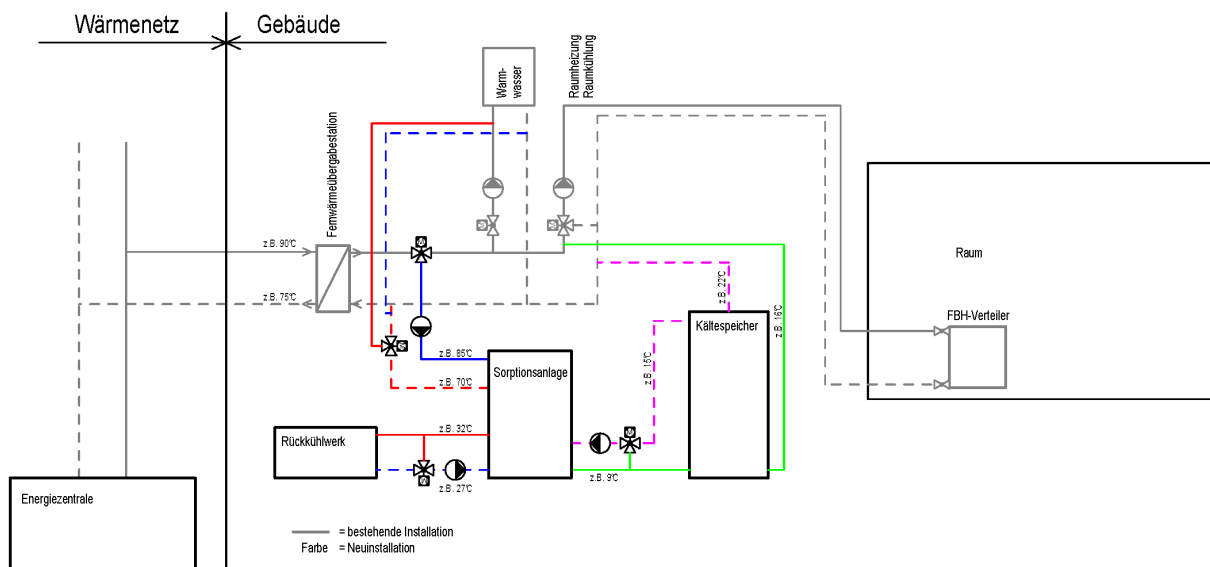


Abbildung 15: Schema Kälteverteilung über Fussbodenheizung am Beispiel mit einer dezentralen Sorptionsanlage

4.2 Thermoaktive Bauteilsysteme TABS

Thermoaktive Bauteilsysteme funktionieren ähnlich wie Fussbodenheizungen mit dem Unterschied, dass die Heizschlangen im Betonkern eingelegt sind. Die TABS arbeiten mit der Speichermasse des Betonkörpers. Somit tragen die Böden und die Decken ihren Anteil zur Wärmeübertragung bei. Im Kühlfall ist die Wirkung der Decken grösser als diejenige der Böden. Bei den TABS ist zu berücksichtigen, dass Boden- und Deckendämmung den Wärmeaustausch unterbinden und sich negativ auf die Leistung auswirken. Mit den TABS kann eine grössere spezifische Wärme- resp. Kühlleistung abgedeckt werden als mit Fussbodenheizungen, was auf die wesentlich grössere Speichermasse des Betons zurück zu führen ist.

Mögliche Kühlleistung Thermoaktiver Bauteilsysteme: 25 - 35 W/m²

Systeme dieser Art sind bereits häufig realisiert und sind Stand der Technik. Ein Beispiel dafür ist die Überbauung City Gate in Basel, wobei TABS zum Heizen und zur Kühlung der Gebäude eingesetzt werden. Die Kühlung erfolgt dabei soweit möglich über «natural cooling». Erst wenn dieses Potenzial erschöpft ist, kommt die Unterstützung durch eine Wärmepumpe/Kältemaschine zum Tragen [9].

4.3 Heizkörper

Heizkörper gibt es in vielfältigen verschiedenen Formen und Aufbauten. Daher kann keine Aussage bezüglich der möglichen Kühlleistung gemacht werden. Eine gewisse Kühlwirkung kann sicher erzielt werden, diese wird jedoch nicht ausreichen, um den gesamten Kühlbedarf abzudecken. Bei der Kühlung über einen Heizkörper muss besonders auf die Betriebstemperaturen geachtet werden, damit es an der Heizkörperoberfläche nicht zu Kondensatbildung kommt.

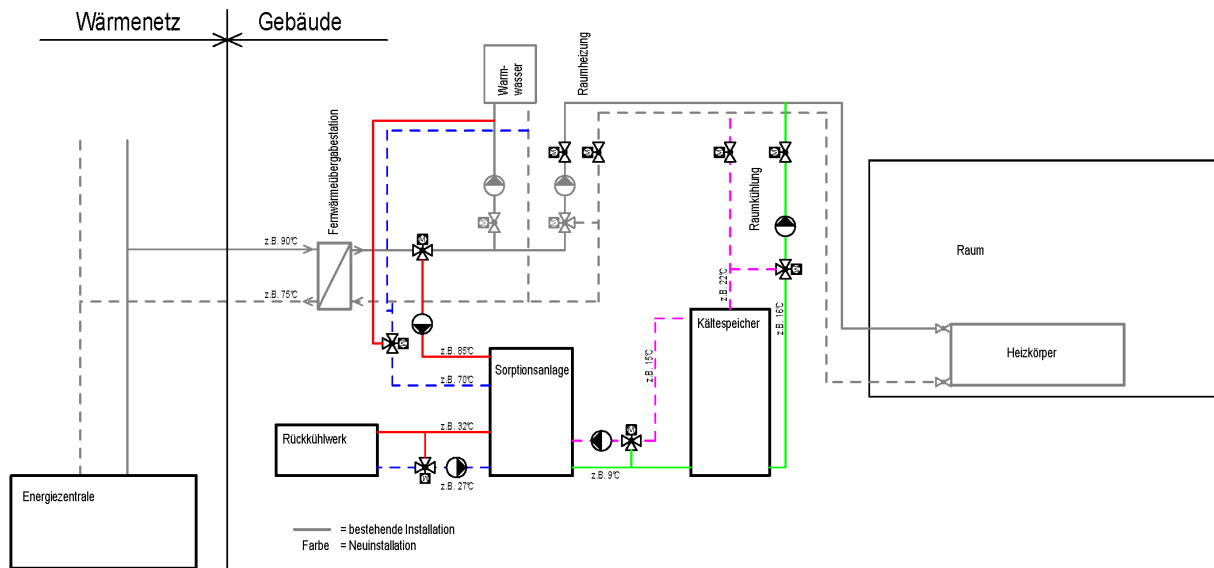


Abbildung 16: Schema Kälteverteilung über Heizkörper am Beispiel mit einer dezentralen Sorptionsanlage

4.4 Deckenkühlelemente

Deckenstrahlplatten und Deckensegel bilden eine geeignete Variante zur Kühlung. Durch ihre Anordnung an den Decken sind ihre Wirkflächen frei und nicht durch die Möblierung oder anderes beeinträchtigt. Sie können ungehindert den darunterliegenden Raum kühlen.

Wie bei den Heizkörpern muss auch hier auf die Betriebstemperaturen geachtet werden damit keine Kondensatbildung eintritt.

Mögliche Kühlleistung Deckenstrahlplatten: $> 100 \text{ W/m}^2$

Mögliche Kühlleistung Deckensegel: $> 80 \text{ W/m}^2$

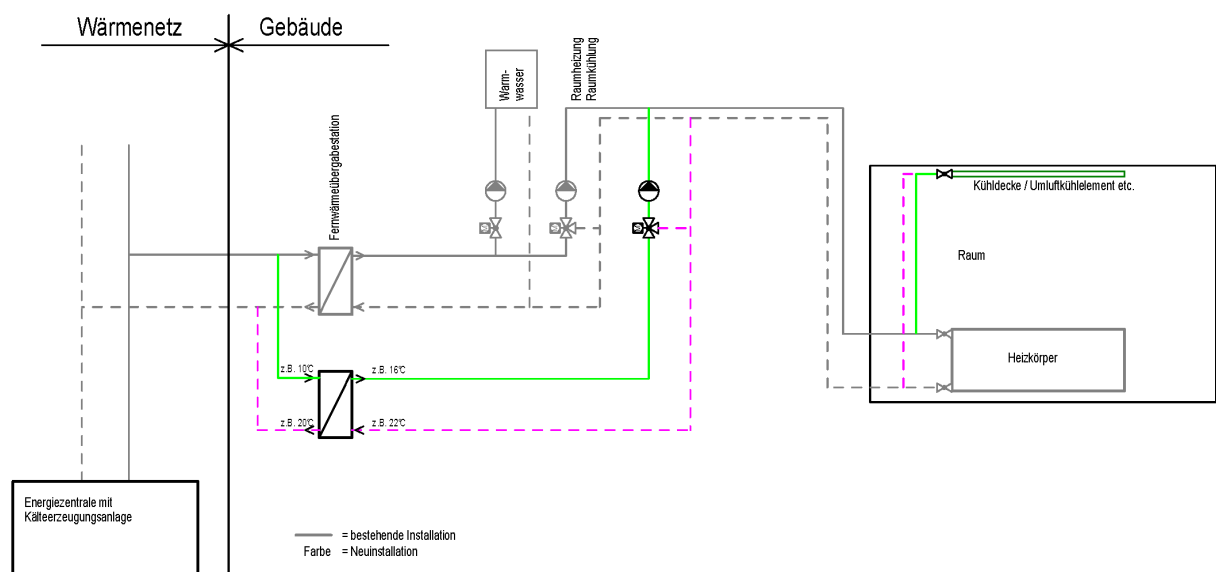


Abbildung 17: Schema Kälteverteilung über Deckenkühlelemente mit separater Gruppeninstallation

5 Betriebskosten

Griffige und allgemein gültige Kosten aufzuführen und damit die Wirtschaftlichkeit von Kälteanlagen zu errechnen sind aufgrund der meistens sehr individuellen Rahmenbedingungen schwierig. Die nachstehenden Kennzahlen sind somit als Richtwerte und Grössenordnungen anzusehen und für jeden konkreten Fall zu überprüfen. Die Berechnungen sollen jedoch die wirtschaftliche Machbarkeit aufzeigen. Diese ist bei geeigneten Rahmenbedingungen gegeben. Auch lässt sich ein Kühlsystem mit einem hohen ökologischen Wert, resp. einem hohen Anteil an erneuerbarer Energie realisieren.

Die Investitionskosten fallen Grossteiles auf der Primärseite an. Auf der sekundären Seite fallen die Investitionskosten je nach vorhandenem Regelsystem gering aus, sofern die Kühlleistung des vorhandenen Heizsystems ausreicht, resp. die damit erzielbare Kühlleistung als genügend akzeptiert wird. Die sekundäre Anlage kann jedoch auch sehr gut auf die individuellen Bedürfnisse angepasst und erweitert werden, was ggf. zusätzliche Investitionskosten zur Folge hat. Dies ermöglicht die Erreichung der gewünschten Klimabedingungen in den Räumen.

Fernleitungsseitig ist massgebend, wo die Kälte erzeugt wird. Bzgl. der Gesamtkosten kann eine zentrale Energieerzeugung und damit die zusätzlichen Investitionen in die Kaltleiter Sinn ergeben. Insbesondere dann, wenn die Bezugsleistung bei den Energiekunden gering und der Aufwand für die Rückkühlanlage hoch ist. Bietet sich bei einer zentralen Energieerzeugung zusätzlich die Möglichkeit die Rückkühlenergie zu nutzen und / oder elektrische Energie erneuerbar zu erzeugen, kann dies weiter für eine zentrale Lösung sprechen und die Kosten für den Leitungsbau rechtfertigen.

Bei den Betriebskosten stellen die Kosten für die Primärenergie einen wesentlichen Kostenfaktor dar. Diese Kosten sollten möglichst tief sein. Es sollte Wärme genutzt werden, welche bereits vorhanden ist (Abwärme aus KVA, WKK und dgl.). In den nachfolgenden Kalkulationen ist die Primärenergie mit 1 Rappen eingesetzt. Diese Kosten beinhalten auch die Hilfsenergie für den Transport auf der Fernleitungsseite (Pumpenenergie), welche im Sommer bei hydraulischer Teillast nicht erheblich sind. Die elektrische Hilfsenergie für die Sorption macht ebenfalls einen wesentlichen Teil der Betriebskosten aus. Muss die Energie im Markt bezogen werden, fallen auch diese Kosten erheblich ins Gewicht. Wird der Strom selbst und erneuerbar produziert, kann in dieser Position anders kalkuliert werden.

Die Energiekosten hängen somit von diversen Faktoren ab. Bzgl. Abschreibung und Kapitalisierung des investierten Kapitals sind allfällige Förderbeiträge und die einmaligen Anschlussgebühren zu berücksichtigen. Letztere führen jedoch nur zu einer Verschiebung des Kostenträgers, kann jedoch in Form von abzugsberechtigten Gebäudeinvestition wirtschaftlich trotzdem Sinn ergeben.

Die nachstehend aufgeführten drei Musterfälle basieren auf folgenden Annahmen:

- Für die Primärenergie fallen nur Kosten für die Pumpenleistung (Hilfsenergie) an.
- Anschluss- und Grundgebühren lehnen sich an Modelle aus der Fernwärme an.
- Die elektrische Energie wird aus dem Stromnetz bezogen.
- Die Rückkühlenergie wird nicht verwendet, resp. nicht als wirtschaftlich entlastendes Element gerechnet.

5.1 Fall 1 – Quartierverbund, zentrale Energieerzeugung (zenKE4L)

Annahme: Quartierverbund mit einem Kühlleistungsbedarf von 100 kW, bei 700 Volllaststunden (Blaue Tabelle: Kosten aus Sicht Investor/Betreiber, grüne Tabelle: Kosten aus Sicht Kältebezüger)

Investitionen					
Sorptionsanlage ²	100 kW Kälteleistung			70'000	CHF
Verteilnetz, exkl. Grabenkosten ³	300 Trm			84'000	CHF
Einbindung Sekundärseite				12'000	CHF
Anschlussgebühr	CHF 600 / kW			- 60'000	CHF
Total Investitionskosten				106'000	CHF
Jährliche Fixkosten					
Amortisation (gemittelt)	25 Jahre			4'240	CHF
Kapitalisierung	2% der Nettoinvestition			2'120	CHF
Betriebskosten	1% der Anlagekosten			1'660	CHF
Total jährliche Fixkosten				8'020	CHF
Variable Kosten pro kWh					
Primärenergie fernwärmeseitig	90'000 kWh	0.01	CHF	900	CHF
Elektrische Energie für Umwälzungen	18'000 kWh	0.19	CHF	3'420	CHF
Total variable Kosten				4'320	CHF
Total Kosten pro Jahr				12'340	CHF
Erträge aus Energiedienstleistungen					
Grundgebühr	CHF 15.00 / kW			1'500	CHF
Arbeitspreis	70'000 kWh	0.16	CHF	11'200	CHF
Total Ertrag				12'700	CHF
Jahreskosten Energiekunde					
Amortisation + Kapitalisierung	7% der Anschlussgebühr			4'200	CHF
Grundgebühr	CHF 15.00 / kW			1'500	CHF
Arbeitspreis	70'000 kWh	0.16	CHF	11'200	CHF
Total Kosten pro Jahr				16'900	CHF
Total Kosten pro kWh				0.241	CHF

Tabelle 1: Kostenkalkulation Quartierverbund mit zentraler Energieerzeugung, Beispiel mit Sorptionsanlage zentral

² In den Kosten sind keine Förderbeiträge eingerechnet.

³ Für die Kostenberechnung wird angenommen, dass die Kaltwasserleitung zusammen mit den Heisswasserleitungen im gleichen Graben verlegt werden können.

5.2 Fall 2 – Mehrfamilienhaus, dezentrale Energieerzeugung (dezKE2L)

Annahme: Mehrfamilienhaus mit einem Kühlleistungsbedarf von 20 kW, bei 700 Volllaststunden
(Blaue Tabelle: Kosten aus Sicht Investor/Betreiber, grüne Tabelle: Kosten aus Sicht Kältebezüger)

Investitionen					
Sorptionsanlage ⁴	20 kW Kälteleistung			40'000	CHF
Einbindung Sekundärseite				6'000	CHF
Anschlussgebühr	CHF 800 / kW			- 16'000	CHF
Total Investitionskosten				30'000	CHF
Jährliche Fixkosten					
Amortisation (gemittelt)	25 Jahre			1'200	CHF
Kapitalisierung	2% der Nettoinvestition			600	CHF
Betriebskosten	1% der Anlagekosten			460	CHF
Total jährliche Fixkosten				2'260	CHF
Variable Kosten pro kWh					
Primärenergie fernwärmeseitig	23'000 kWh	0.01	CHF	230	CHF
Elektrische Energie für Umwälzungen	4'100 kWh	0.19	CHF	780	CHF
Total variable Kosten				1'010	CHF
Total Kosten pro Jahr				3'270	CHF
Erträge aus Energiedienstleistungen					
Grundgebühr	CHF 17.00 / kW			340	CHF
Arbeitspreis	14'000 kWh	0.21	CHF	2'940	CHF
Total Ertrag				3'280	CHF
Jahreskosten Energiekunde					
Amortisation + Kapitalisierung	7% der Anschlussgebühr			1'120	CHF
Grundgebühr	CHF 17.00 / kW			340	CHF
Arbeitspreis	14'000 kWh	0.21	CHF	2'940	CHF
Total Kosten pro Jahr				4'400	CHF
Total Kosten pro kWh				0.314	CHF

Tabelle 2: Kostenkalkulation Mehrfamilienhaus mit dezentraler Energieerzeugung, Beispiel mit Sorptionsanlage dezentral

⁴ In den Kosten sind keine Förderbeiträge eingerechnet.

5.3 Fall 3 – Einfamilienhaus, dezentrale Energieerzeugung (dezKE2L)

Annahme: Einfamilienhaus mit einem Kühlleistungsbedarf von 4 kW, bei 700 Volllaststunden
(Blaue Tabelle: Kosten aus Sicht Investor/Betreiber, grüne Tabelle: Kosten aus Sicht Kältebezüger)

Investitionen					
Sorptionsanlage ⁵	4 kW Kälteleistung			35'000	CHF
Einbindung Sekundärseite				4'000	CHF
Anschlussgebühr	CHF 1'500 / kW			- 6'000	CHF
Total Investitionskosten				33'000	CHF
Jährliche Fixkosten					
Amortisation (gemittelt)	25 Jahre			1'320	CHF
Kapitalisierung	2% der Nettoinvestition			660	CHF
Betriebskosten	1% der Anlagekosten			390	CHF
Total jährliche Fixkosten				2'370	CHF
Variable Kosten pro kWh					
Primärenergie fernwärmeseitig	2'800 kWh	0.01	CHF	30	CHF
Elektrische Energie für Umwälzungen	700 kWh	0.19	CHF	130	CHF
Total variable Kosten				140	CHF
Total Kosten pro Jahr				2'510	CHF
Erträge aus Energiedienstleistungen					
Grundgebühr	CHF 100.00 / kW			400	CHF
Arbeitspreis	2'800 kWh	0.76	CHF	2'128	CHF
Total Ertrag				2'528	CHF
Jahreskosten Energiekunde					
Amortisation + Kapitalisierung	7% der Anschlussgebühr			420	CHF
Grundgebühr	CHF 100.00 / kW			400	CHF
Arbeitspreis	2'800 kWh	0.76	CHF	2'128	CHF
Total Kosten pro Jahr				2'948	CHF
Total Kosten pro kWh				1.053	CHF

Tabelle 3: Kostenkalkulation Einfamilienhaus mit dezentraler Energieerzeugung, Beispiel mit Sorptionsanlage dezentral

⁵ In den Kosten sind keine Förderbeiträge eingerechnet.

6 Schlussfolgerung

Komfortkälte ist bereits heute ein Bedürfnis und wird für die nächsten Dekaden stark zunehmen. Je nach Prognosemodell wird die dazu notwendige Energiemenge mit der Heizenergie gleichziehen. Die Heizenergie wird durch die bessere Dämmwirkung bei Fassade, Dach und Fensterflächen, sowie regulierte Lüftungen abnehmen. Der Kühlbedarf wird durch die steigende Aussentemperatur, welche zudem über eine längere Zeit andauert, und durch die Abwärme von zusätzlichen technischen Geräten zunehmen.

Es macht also Sinn, über effiziente Kühlsysteme nachzudenken und das Angebot seitens Energieversorger von Heiz- und Trinkwarmwasserenergie auf Kühlenergie auszuweiten.

Die Effizienz (ökologisch und ökonomisch) von Kühlsystemen hängt von den vorhandenen Rahmenbedingungen ab. Die wichtigsten Rahmenbedingungen sind:

- Fernwärmeversorgung bereits vorhanden
- Möglichkeit einer Quartierzentrale mit Nutzung von Nebenenergien (Photovoltaik, Geothermie)
- Vorhandenes Heizsystem (Fussbodenheizung, Radiatoren)
- Neubauten / Altbauten
- Gebäudegrößen

Für den Fall der Installation einer zentralen oder dezentralen Sorptionsanlage muss die Primärenergie kostengünstig vorhanden sein. Ideal ist hier die Nutzung von vorhandener Abwärme, beispielsweise aus einer KVA, einer WKK oder aus der Industrie.

Die elektrische Energie für Hilfsprozesse (Pumpen, Kompressoren), oder im Fall der Kompressionskälte die Primärenergie, sollte wenn möglich erneuerbar und in Eigenproduktion hergestellt werden. Eine PV-Anlage auf der Quartierzentrale bietet hierzu optimale Voraussetzungen.

Anhand der ausgewerteten Daten kann festgestellt werden, dass mit der Nutzung von Fernwärme zwei Systeme zur Erzeugung von Komfortkälte wirtschaftlich betrieben werden können.

1. Dezentrale Anlage mit einer Sorptionsmaschine und Rückkühlwerk vor Ort

Je nach Kosten für die Primär- und Hilfsenergie, kann die Kühlenergie für ca. 25 - 30 Rp. / kWh erzeugt werden.

Dezentrale Kühlanlagen machen ab einer installierten Leistung von ca. 20 kW wirtschaftlich Sinn. Kleinere Anlagen verursachen hohe Investitionskosten die Energiegestehungskosten weit über gängigen Systemen der Kompressionskälte mit sich bringen.

2. Quartierzentrale mit 4-Leiter-Verteilnetz

Bei optimierter Anlagentechnik und hoher Eigenproduktion kann Komfortkälte unter 20 Rp. / kWh erzeugt und angeboten werden.

Die Kälteverteilung beim Energiekunden kann über die Fussbodenheizung, die Heizkörper oder nur für die Kühlung installierte Deckenelemente erfolgen. Beim Kühlen über die Heizkörper ist von recht geringer Kühlleistung auszugehen. Auch das Kühlen über die Fussbodenheizung hat eine begrenzte Kühlwirkung. Mit dem Einbinden von zusätzlichen Deckenelementen in das Heizsystem, können Zimmer mit höherem Kühlbedarf besser gekühlt werden ohne dass die bestehende Installation umfangreich ausgebaut werden muss. Insbesondere bei älteren Gebäuden mit Aufputz-Heizkörper-Installationen stellt diese Bauart eine sehr interessante Variante dar.

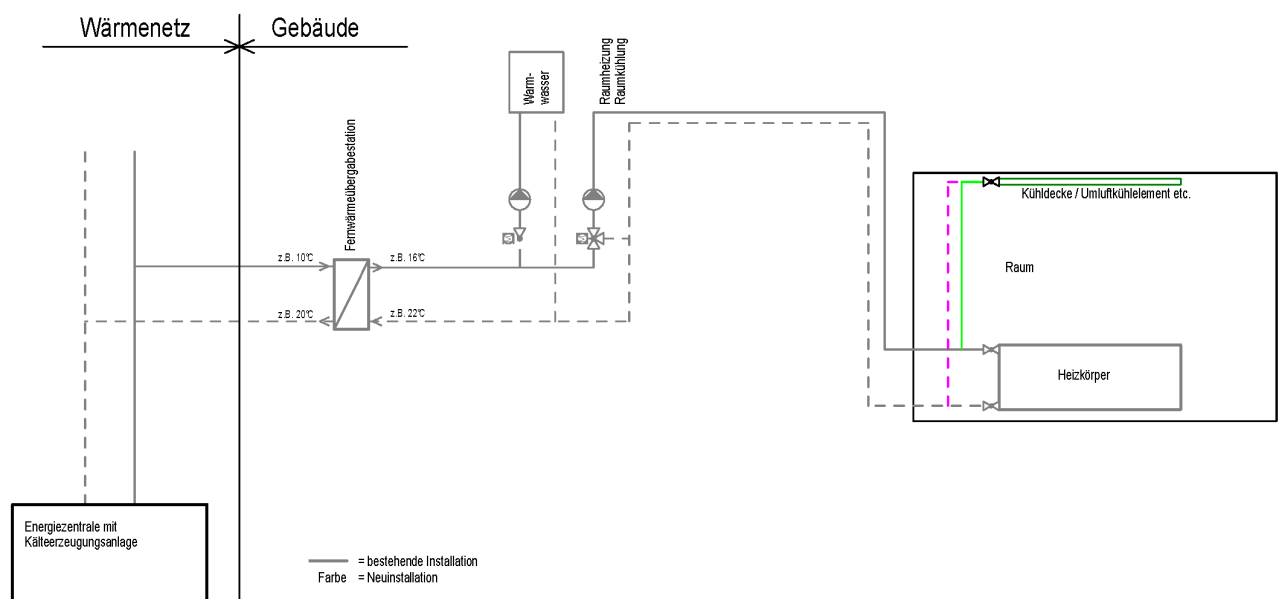


Abbildung 18: Schema Erweiterung Heizungsinstallation durch Deckenkühlelemente

Alternativen mit zentral installierten Kühlgeräten ohne Fernwärme als Primärenergie

Die gängigste Alternative im Segment Wohnen und Arbeiten sind Klimageräte. Kleinere und größere dieser Geräte sind im Detail- und Fachhandel bereits mit wenigen hundert Franken Investition erhältlich. Es kann zwischen 3 Gerätetypen unterschieden werden:

1. Mobile Monoblock-Geräte mit integrierter Rückkühlung
Diese Geräte haben eine geringere Leistung und erzeugen deutliche Geräusche, da die Abwärme nicht an die Umwelt abgegeben werden kann. Die meisten Geräte können zur Luftbefeuchtung, einige im Umkehrbetrieb auch zur Wärmeerzeugung genutzt werden.
2. Mobile Monoblock-Geräte mit Abluftschlauch
Diese Geräte weisen einen besseren Wirkungsgrad auf, erzeugen jedoch auch deutlich hörbaren Lärm.
3. Splitlithgeräte mit Aussenmodul
Diese Geräte haben einen guten bis sehr guten Wirkungsgrad. Das lärmintensive Modul befindet sich ausserhalb der Räume auf dem Dach oder an der Fassade. Damit beschränkt sich die Lärmemission auf ein Minimum.

Mit einem qualitativ hochwertigen Raum-Klimagerät können gute Kühlergebnisse erzielt werden. Ein grosser Nachteil gegenüber den Kühlmöglichkeiten mit einem Flächenabgabesystem liegt darin, dass diese Raum-Kühlgeräte teils starken Luftzug erzeugen. Viele Menschen reagieren mit gesundheitlichen Problemen auf Kühlanlagen mit Luftkühlung.

Nachstehende Tabelle zeigt die Eigenschaften der Kühlmöglichkeiten auf. Die diesem Vergleich zugrundeliegenden Daten sind empirisch und können je nach Modell abweichen. Bei der Fernkälte wird ein System mit zentraler Kälteerzeugung und Deckenkühlelementen zugrunde gelegt.

	Mobiles Kühlgerät (Monoblock) mit integrierter Rückkühlung	Mobiles Kühlgerät (Monoblock) mit Abluftschlauch	Splittgerät mit Aussenmodul	Fernkälte mit Deckenkühlelementen
Kühlleistung (handelsübliche Geräte)	ca. 2 kW	ca. 3-4 kW	bis ca. 15 kW	100 W/m ² bei 50m ² = 5 kW
Wirkungsgrad SEER	2.2 – 2.7	2.4 – 2.8	3.0 – 4.0	bis 28 wenn für Primärenergie Abwärme genutzt wird.
Lärmemission innen	ca. 65 dB(A)	ca. 65 dB(A)	ca. 40 dB(A)	keine Lärmemission
Lärmemission aussen	keine Lärmemission	gering	ca. 68 dB(A)	keine Lärmemission
Beeinträchtigung Raum	moderat	erheblich	moderat	sehr gering
Beeinträchtigung Komfort durch Luftzug	erheblich	erheblich	erheblich	keine Beeinträchtigung
Investitionskosten pro kW Kühlleistung	ca. CHF 500.--	ca. CHF 500.--	ca. CHF 1'200.--	ca. CHF 2'100.-- davon CHF 1'500.--für Deckenkühlelemente
Lebensdauer	ca. 5 Jahre	ca. 5 Jahre	ca. 10 Jahre	ca. 25 Jahre
Energiekosten / kW	CHF 0.11	CHF 0.10	CHF 0.08	CHF 0.16 ⁶

Tabelle 4: Vergleich Kühlsysteme elektrisch mit Sorptionskälte

Sowohl die Sorptions- wie auch die Kompressionskältetechnik bietet die Möglichkeit einer zentralen oder dezentralen Kälteerzeugung. Bei Kleingeräten für einzelne Räume sind mit Sorptionstechnik ausgerüstete Geräte noch wenig Angebote im Markt vorhanden.

Mit einer Kälteversorgung aus Fernwärmenetzen kann die überschüssige Wärmeenergie und bestehende Infrastrukturen (Energieverteilung) genutzt werden und über Flächenabgabesysteme gekühlt werden.

Der jeweils geeignete Einsatz der Systeme muss für jedes Vorhaben individuell abgewogen werden.

⁶ Die Energiekosten bei der Sorptionskälte sind stark von der Infrastruktur abhängig (Primärenergie, Hilfsenergie Förderpumpen). Der angegebene Wert umfasst eine Anlage gemäss Kapitel 5.1, mit Nutzung von Abwärme.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Meteo Schweiz. *Klimareport 2018*. Verfügbar unter <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/service-und-publikationen/publikationen.sub-page.html/de/data/publications/2019/5/klimareport-2018.html>, August 2019.
- [2] Meteo Schweiz. *Klimadaten 2018 und 2019*. Verfügbar unter <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/service-und-publikationen/publikationen.sub-page.html/de/data/publications/2019/5/klimareport-2018.html>, August 2019.
- [3] Norm SIA 180:2014 - Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden
- [4] Settembrini G., et al., *Climabau*. Horw: Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 2010
- [5] Bundesamt für Statistik. *Haushaltsgrösse 2017*. Verfügbar unter <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bevoelkerung/stand-entwicklung/haushalte.html>, Oktober 2019.
- [6] Wikipedia. *Adsorptionstechnik*. Verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Adsorptionsk%C3%A4ltemaschine>, August 2019
- [7] Wikipedia. *Absorptionstechnik*. Verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Absorptionsk%C3%A4ltemaschine>, August 2019
- [8] EnFK. *Fernwärme in Kürze*. Horw: Hochschule Luzern – Technik & Architektur, März 2019
- [9] Schmid A. Gruner Gruneko AG, Basel
- [10] Verband Fernwärme Schweiz, *Leitfaden Fernwärme*, August 2018. Verfügbar unter <https://www.fernwaerme-schweiz.ch/fernwaerme-deutsch/Dienstleistungen/Leitfaden.php>, März 2020.
- [11] Trecco S., et al., *Thermische Netze – Entscheidungskriterien für die Systemwahl Phase 2.*, Eicher + Pauli AG, September 2019

8 Abkürzungen

FWN	Fernwärmenetz
K	Kelvin
KK	Klimakälte
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunden
kWh/a	Kilowattstunden pro Jahr
PV	Photovoltaik
TWW	Trinkwarmwasser
RW	Raumwärme
RL	Rücklauf
VL	Vorlauf
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio
TABS	Thermoaktive Bauteilsysteme
Trm	Trassemeter
WKK	Wärme-Kraft-Kopplung
°C	Grad (Celsius)