WÄRME.
WISSEN.
KOMPAKT.

Technologien für erneuerbare Wärme

BÜRGER
BEGEHREN
KLIMASCHUTZ

Inhaltsverzeichnis

Wärmepumpe.....3

Flusswärmepumpe.....7

Solarthermie.....11

Tiefe Geothermie.....15

Abwasser-Wärmepumpen.....19

Abwärme aus Rechenzentren.....23

Industrielle Abwärme.....27

Power-to-Heat.....31

Wärmespeicher.....35

Wasserstoff.....39

WÄRME.WISSEN.KOMPAKT.

Wärmepumpe

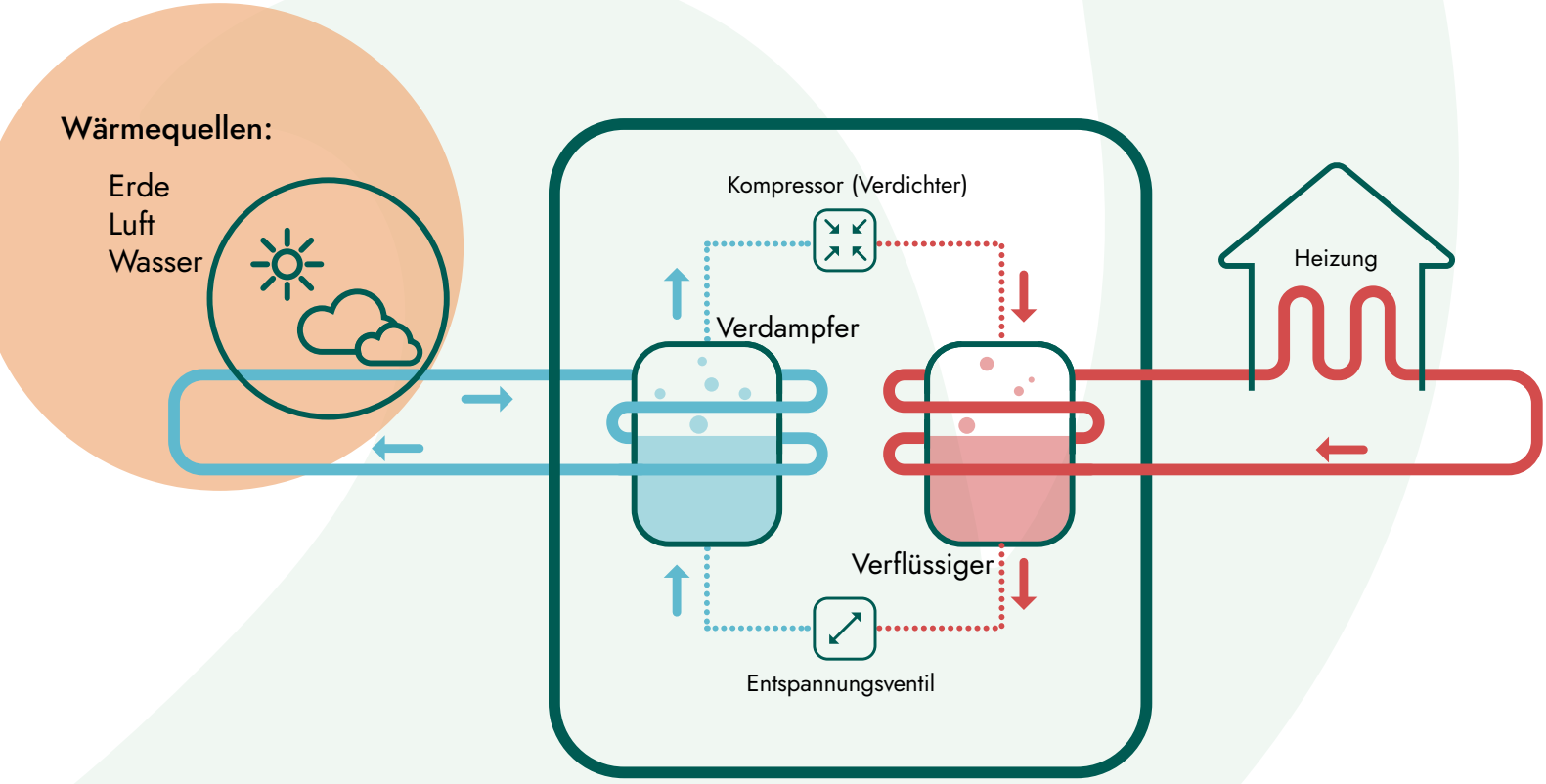
BÜRGER
BEGEHREN
KLIMASCHUTZ

Wärmepumpe

Wärmepumpen werden die entscheidende Heiztechnologie einer erneuerbaren Wärmeversorgung sein. Bereits jetzt sind in über 40 % der Neubauten Wärmepumpen im Einsatz. Zu rechnen ist mit einer weiteren Dynamik und einer Zunahme der Wärmepumpen sowohl im Altbau als auch im Bestand. Der Bundesverband Wärmepumpe schätzt, dass dieses Jahr etwa 350.000 Wärmepumpen eingebaut werden, ab 2024 strebt die Bundesregierung den Einbau von 500.000 Wärmepumpen pro Jahr an. Diese ehrgeizigen Ziele sollen durch den verpflichtenden Anteil von 65 % erneuerbaren Energien beim Austausch der Heizung erreicht werden, der 2024 verbindlich werden soll.

Wärmepumpen nutzen zum Heizen Umweltwärme. Diese stammt bei Wärmepumpen für einzelne Gebäude meist aus der Luft, in manchen Fällen auch dem Erdreich (Erdsonden) oder dem Grundwasser. Aber auch Abwärme, Abwasserwärme, tiefe Geothermie oder Solarthermie können genutzt werden. Die Wärmepumpe arbeitet dann wie ein Kühlschrank – nur, dass statt Kälte, Wärme bereitgestellt wird. Während ein Kühlschrank dem Inneren Wärme entzieht und sie nach außen leitet, entzieht die Wärmepumpe dem entsprechenden Umweltmedium die Wärme, erhöht ihre Temperatur und gibt sie an die Heizungsanlage ab.

Die Wärmepumpe nutzt ein Kältemittel, das die Umgebungswärme aufnimmt und dabei gasförmig wird (Verdampfer). Dieses wird anschließend, meist durch einen Elektromotor, im Verdichter verdichtet, wodurch sich die Temperatur erhöht und ein nutzbares Niveau erreicht. Anschließend wird diese Temperatur an die Heizungsanlage abgegeben (Kondensator). Dann wird der Druck wieder reduziert und der Kreislauf beginnt erneut. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass mit vergleichsweise geringem Stromeinsatz ein Vielfaches an Wärme erzeugt werden kann.



Aus einer kWh Strom werden so 3-4 kWh Wärme. Das Verhältnis von Strombedarf zu Wärmeerzeugung wird mit der Jahresarbeitszahl angegeben. Erzeugt die Wärmepumpe aus 1 kWh Strom 3 kWh Wärme, so liegt die Arbeitszahl bei 3, sind es 4 kWh Wärme, liegt die Arbeitszahl bei 4. Eine Wärmepumpe arbeitet umso effizienter, je geringer die Temperaturdifferenz zwischen der genutzten Umweltwärme und der benötigten Heizwärme ist. Eine hohe Temperatur der genutzten Umweltwärme ist also ebenso günstig wie eine niedrige Heizungstemperatur. Wärmepumpen sind aber explizit keine Technologie nur für den Neubau. Auch im Bestand können Wärmepumpen mit akzeptablen Jahresarbeitszahlen genutzt werden. Der Einbau einer Fußbodenheizung ist dafür nicht erforderlich, an einigen Stellen kann jedoch der Einbau größerer Heizkörper ein sinnvoller Schritt sein. Bei einem besser gedämmten Gebäude wäre die Effizienz der Wärmepumpe größer und damit der Strombedarf geringer – ein Ergebnis, was sich im Bestand durch nachträgliche Sanierungen auch erreichen lässt.

Neben Wärmepumpen, die einzelne Gebäude oder Gebäudekomplexe mit Wärme versorgen, gibt es auch große Wärmepumpen, die Umweltwärme für die Fernwärme auf das benötigte Temperaturniveau heben.

Erdsonden-Wärmepumpen

Erdsonden-Wärmepumpen nutzen die natürliche Erdwärme in maximal 400 Metern Tiefe. Während für einzelne Gebäude die Bohrungen in der Regel nicht tiefer sind als 100 Meter, können für Erdsonden-Wärmepumpen, deren Wärme in das Fernwärmenetz eingespeist wird, auch Bohrungen von bis zu 400 Meter Tiefe sinnvoll sein. Dabei werden die Erdsonden über Bohrungen senkrecht in den Untergrund eingefügt. Die Erdwärmesonden sind Rohrleitungen in denen eine Flüssigkeit als Wärmeträger zirkuliert, welche die Untergrundwärme aufnimmt und an die Erdoberfläche transportiert. Oberirdisch wird die Quelltemperatur über eine Wärmepumpe auf eine für die Fernwärme nutzbare Temperatur angehoben. Die abgekühlte Flüssigkeit wird anschließend im Boden wieder erwärmt. Bei einer Erdwärmesonden-Anlage werden mehrere solcher Sonden mit einem Abstand von etwa fünf bis sechs Metern nebeneinander im Erdboden versenkt. Um eine Auskühlung des Bodens zu vermeiden, kann im Sommer überschüssige Wärme wieder ins Erdreich geleitet werden.

Soll ein Gebäude mit einer Wärmepumpe ausgestattet werden, ist in einer Bestandsaufnahme zunächst zu prüfen, ob das Gebäude mit einer Wärmepumpe beheizt werden kann, welche Art der Wärmepumpe möglich ist und welche Auflagen für den Einbau der Wärmepumpe bestehen. Für eine Erdsondenwärmepumpe muss eine ausreichend große, unversiegelte Fläche verfügbar sein und zunächst ein Bodengutachten erstellt werden. Grundsätzlich ist es möglich, die Fläche nach Verlegung der Erdsonden zu bebauen. Die Wärmepumpe muss anschließend richtig dimensioniert werden. Da der Einbau von Wärmepumpen finanziell gefördert wird, sollten auch die entsprechenden Förderbedingungen geprüft werden.

Praxisbeispiel Reken

Ein Forschungsprojekt zur Potenzialerhebung hat aufgezeigt, dass etwa 75 % der Gebäude mit einer Wärmepumpe beheizt werden können. Die größten Potenziale haben dabei Luft-Wärme-Pumpen und Erdsonden-Wärmepumpen.

Mit 236.000 installierten Wärmepumpen im Jahr 2022 gehört diese Technologie mittlerweile zum Standard. Am häufigsten ist der Einbau von Luft-Wärmepumpen. Hier sind die Anschaffungskosten und die benötigten Genehmigungen geringer. Aufgrund der in der Regel niedrigeren Jahresarbeitszahl fallen allerdings die Betriebskosten höher aus. Es wird mehr Strom benötigt, um die gleiche Menge an Wärme bereitzustellen.

Wie eine Wärmeversorgung mit einer Erdsonden-Wärmepumpe im Einzelgebäude aussehen kann, zeigt ein Beispiel in Reken. Die 2019 gebauten Erdsonden versorgen das 250 m^2 große Eigenheim im Winter mit Wärme und kühlen es im Sommer. Der Strom für den Betrieb der Wärmepumpe wird auf dem eigenen Dach erzeugt. Ein Stromspeicher ermöglicht eine Eigenverbrauchsquote von etwa 75 %. Die Mehrkosten der Erdwärmebohrungen im Vergleich zu einer Luft-Wärmepumpe zahlen sich über die Zeit aus. Anders als die Wärmepumpe, die nach Ende ihrer Nutzungsdauer getauscht werden muss, können die Bohrungen über viele Jahrzehnte hinweg genutzt werden.

Quellen und weitere Informationen:

- https://buerger-begehren-klimaschutz.de/wp-content/uploads/2021/10/Potenzialstudie_Berlin.pdf, S. 24
- https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/umgebungswaerme-waermepumpen#umgebungsw%C3%A4rme
- https://www.deutsche-handwerks-zeitung.de/waermepumpen-shk-handwerk-haelt-einbauziele-fuer-machbar-285866/
- https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/65-prozent-erneuerbare-energien-beim-einabau-von-neuen-heizungen-ab-2024.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/umgebungswaerme-waermepumpen#funktion
- https://info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/01/Policy_Paper_04_Waermepumpe.pdf, S. 5
- https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/umgebungswaerme-waermepumpen#kennzahlen
- https://www.energie-experten.org/projekte/schweriner-stadthaeuser-aus-20er-jahren-heizen-mit-waermepumpen
- https://green-planet-energy.de/blog/wissen/waermepumpen/waermepumpen-blogserie-zwei-altbauten-mit-waermepumpen-im-praxis-test/
- https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/heizen-bauen/waermepumpe#gewusst-wie,
- https://www.effizienzhaus-online.de/waermepumpe-checkliste/
- https://www.ffe.de/projekte/waermepumpen-ampel/
- https://background.tagesspiegel.de/energie-klima/gas-dominiert-weiter-den-heizungsmarkt.
- https://www.energieheld.de/heizung/waermepumpe/kosten
- https://www.energie-experten.org/projekte/reken-erdwaerme-versorgt-waermepumpe-und-lueftung

Foto: BürgerBegehren Klimaschutz

BÜRGER BEGEHREN KLIMASCHUTZ

WÄRME.WISSEN.KOMPAKT.

Flusswärmepumpe

BÜRGER
BEGEHREN
KLIMASCHUTZ

Flusswärmepumpe

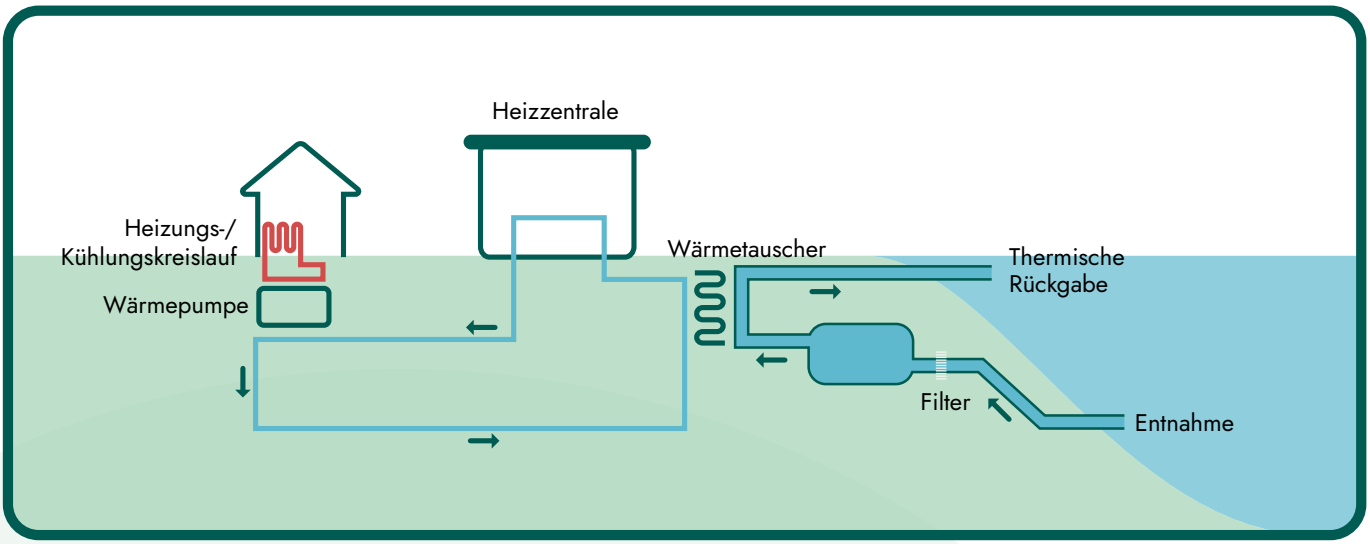
Eine erneuerbare Wärmeversorgung ist in hohem Maße auf Umweltwärme angewiesen. Das können zum Beispiel Flüsse und Seen sein, denn sie verfügen auch im Winter über deutlich höhere Temperaturen als die Umgebungsluft. Damit sind sie hervorragende Wärmelieferanten. Eine genaue bundesweite Aufschlüsselung über die verfügbaren Wärmepotenziale gibt es bisher leider nicht. Potenzialstudien in verschiedenen Städten haben aber aufgezeigt, dass Fluss- bzw. Seewärmepumpen einen signifikanten Beitrag zur Deckung des Fernwärmebedarfs leisten können.

In Berlin liegt dieser Anteil aufs ganze Jahr betrachtet bei über 12 %, bei vergleichsweise geringen Investitionskosten. Im Großraum Mannheim-Heidelberg, der über ein großes Fernwärmenetz mit über 2 TWh pro Jahr Fernwärmeverbrauch versorgt wird, kann der wirtschaftliche Anteil der Flusswärme an der Fernwärmebereitstellung sogar bei 26 % und mehr liegen.

Um die Wärme aus den Gewässern für die Fernwärmeerzeugung nutzbar zu machen, wird das Flusswasser abgekühlt und somit Wärmeenergie entzogen. Die Flusswärme wird mittels einer Hochtemperatur-Wärmepumpe auf ein höheres Temperaturniveau gebracht und kann dann in das Fernwärmenetz eingespeist werden. Das Flusswasser hat eine bessere Wärmespeicherkapazität als Luft und reagiert weniger stark auf kurzfristige Wetter- bzw. Temperaturveränderungen. Bei langfristig tiefen Umgebungstemperaturen kühlen jedoch auch die Flüsse aus. Die Klima- und Wetterabhängigkeit der Flusswassertemperatur wirkt demnach auch beschränkend auf die Nutzung der Potenziale, da bei sehr kalten Außentemperaturen der Heizbedarf wächst, die Flüsse aber weniger Wärme bereitstellen können. Gewässer eignen sich deshalb vor allem in den Übergangsmonaten, im Herbst und im Frühjahr, als Wärmequellen und weniger in extremen Wettersituationen. In den kalten Wintermonaten, im Januar und Februar, kann die Wassertemperatur zu niedrig sein, um Wärme ohne eine Unterschreitung des Gefrierpunkts sicher zu entnehmen.

Grundsätzlich kann den Flüssen nur so viel Wärme entzogen werden, dass sich dies nicht nachteilig auf das Ökosystem auswirkt. In der Regel ist wasserrechtlich eine Abkühlung des Flusswassers um drei Kelvin erlaubt, die Berliner Potenzialstudie geht in ihrer konservativen Berechnung von einer Absenkung der Temperatur des gesamten Fließgewässers von 0,5 Kelvin aus.

Um Flusswasser-Wärmepumpen zu bauen ist die Identifikation geeigneter Standorte entscheidend, die sich zum einen in der Nähe eines Einspeisepunktes in das Fernwärmenetz befinden und zum anderen den baulichen Anforderungen des Entnahmebauwerks und der Anlagentechnik gerecht werden. Durch eine Verträglichkeitsprüfung kann der Einfluss der Wärmeentnahme sowie der baulichen Maßnahmen auf das Ökosystem des Flusses standortspezifisch untersucht werden. Anhand dessen lassen sich die technischen Grenzen (z.B. Mindesttemperatur oder maximale Durchflussrate) ableiten.



In Mannheim und in Heidelberg, welche über ein gemeinsames Fernwärmenetz verbunden sind, sollen Flusswärmepumpen gebaut werden. In Mannheim ist der Spatenstich für eine erste Flusswärmepumpe bereits erfolgt. Sie hat eine thermische Leistung von 20 MW und kann damit theoretisch 175 GWh pro Jahr an Wärme bereitstellen, wenn sie das ganze Jahr über bei voller Leistung betrieben wird. Gemessen am Fernwärmeverbrauch im Fernwärmenetz der Region Mannheim-Heidelberg ist das nur ein kleiner Anteil von 7%. Es soll aber nicht bei einer Flusswärmepumpe bleiben. In Heidelberg hat die Standortsuche für eine oder mehrere Flusswärmepumpen begonnen, womit 10-20% des Heidelberger Fernwärmeverbrauchs gedeckt werden soll und der Gesamtanteil der Flusswärme in der Region auf 27% gesteigert werden kann. Perspektivisch ist auch ein höherer Anteil der Flusswärme am Fernwärmeverbrauch möglich. Dieses setzt aber voraus, dass die hohen Temperaturen, mit welchen das Fernwärmenetz betrieben wird, abgesenkt werden. Damit die Wärmepumpe nicht zu viel Strom verbraucht, sollte ihre Wärmeerzeugungstemperatur unter 80°C liegen.

BÜRGER
BEGEHREN
KLIMASCHUTZ

Interview mit Amany von Oehsen

Wie kam es zu dem Bau der Flusswärmepumpe in Mannheim?

Zur Flusswärmepumpe in Mannheim existierten Überlegungen der MVV Energie AG schon im Jahre 2014, um den Anteil grüner Fernwärme zu steigern. Leider waren Kohle, Öl und Gas lange Zeit so billig, dass sich die Flusswärmepumpe nicht wirtschaftlich konkurrenzfähig betreiben ließ und es gab es für das Projekt über Jahre hinweg keine Fördermittel. Anlass den Flusswärmepumpenbau in Mannheim 2021 endlich zu beginnen, war einerseits der steigende CO_2-Preis und die auf Bundesebene vorgezogenen Klimaziele. Auch der Druck durch Umweltverbände und Zivilgesellschaft und das Bemühen um ein grünes Image dürften eine Rolle gespielt haben. Ferner wurde es möglich, ein Förderprogramm der Regierung für den Bau der Flusswärmepumpe zu nutzen.

Wer betreibt die Flusswärmepumpe und wie wird sie genutzt?

In Mannheim wird die Flusswärmepumpe durch die Grosskraftwerk Mannheim AG im Auftrag der MVV gebaut und durch die MVV betrieben. Nach Aussage der MVV soll die Flusswärmepumpe nicht mit Steinkohlestrom sondern mit Ökostrom versorgt werden. Für die Flusswärmepumpe wird ein Teil des Rheinwassers entnommen, um 3°C abgekühlt und anschließend wieder eingeleitet. Der Standort der Flusswärmepumpe liegt am Großkraftwerk Mannheim, dort gibt es eine Flusswasserentnahmegenehmigung, die bisher nur für das GKM genutzt wurde und nun auch für die Flusswärmepumpe genutzt werden soll. Es wird keine Abwärme des Kraftwerks durch die Flusswärmepumpe zurückgewonnen, es handelt sich um reine Umweltwärme, die gewonnen wird.

Welchen Anteil haben Klimainitiativen am Bau der Flusswärmepumpe in Heidelberg?

Dass in Heidelberg nun auch nach einem Standort für Flusswärme gesucht wird, ist auf eine vom BUND Heidelberg beauftragte Studie zum Potenzial erneuerbarer Wärmeerzeuger zurückzuführen und die anschließende Öffentlichkeitsarbeit durch BUND, die Initiative Heidelberg kohlefrei und Fridays for Future. So konnte der Kommunalpolitik das große Potenzial der Flusswärme vor Augen geführt werden. Dies erforderte jedoch einen langen Atem über zwei Jahre hinweg.

Dipl. -Phys. Dr. - Ing. Amany von Oehsen
– Umweltberaterin beim BUND Heidelberg, Energieberaterin im Ingenieurbüro epotenziale sowie Mitbegründerin der Initiative Heidelberg kohlefrei.

Quellen und weitere Informationen:

- https://buerger-begehren-klimaschutz.de/wp-content/uploads/2021/10/Potenzialstudie_Berlin.pdf S. 12f., S. 31ff.,
- https://energy.ec.europa.eu/system/files/2021-01/de_ca_2020_de_0.pdf , S. 115
- https://hd-kohlefrei.de/wp-content/uploads/2021/04/Fernwaerme_Klimaschutzpotenziale_Studie_Teil1-3.pdf S. 9, S. 25
- https://www.mvv.de/journalisten/pressemitteilungen/detail/spatenstich-fuer-klimafreundliche-flusswaermepumpe-von-mvv-in-mannheim

Foto: Amany von Oehsen

BÜRGER BEGEHREN KLIMASCHUTZ

WÄRME.WISSEN.KOMPAKT.

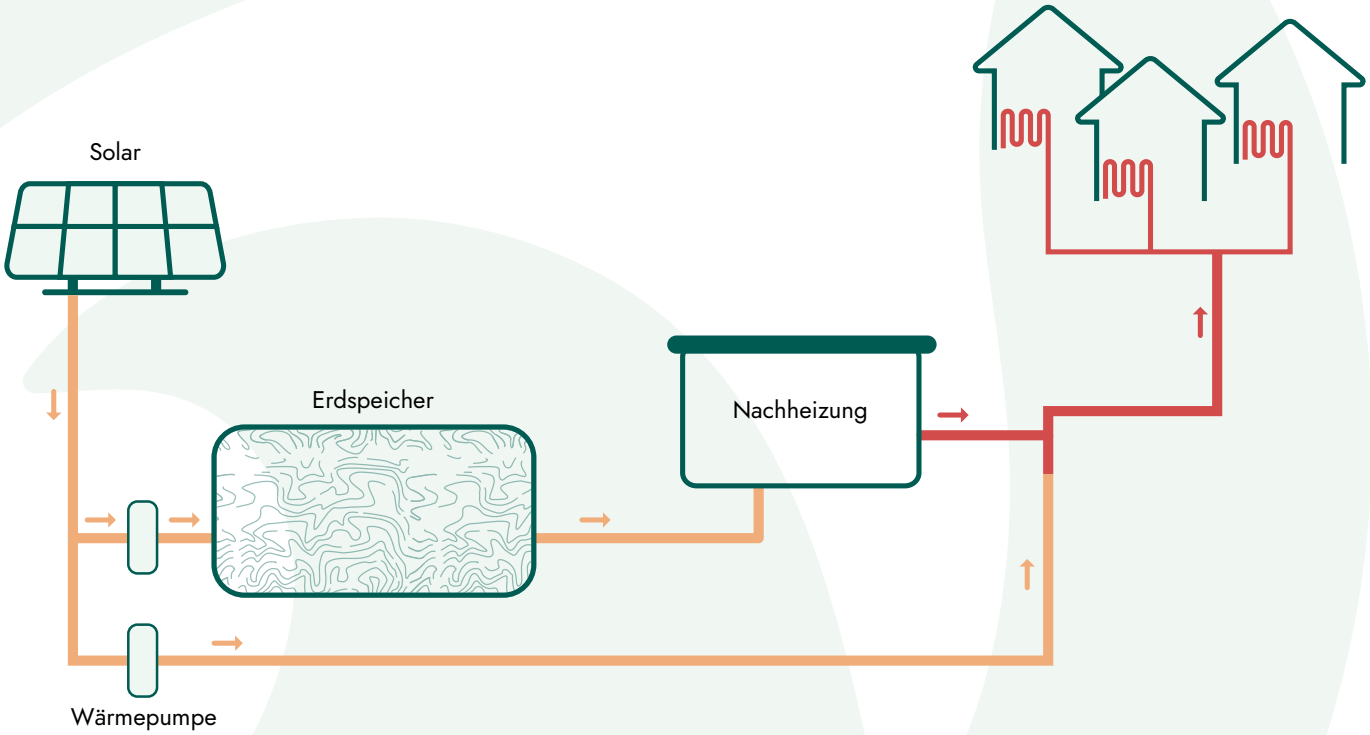
Solarthermie

BÜRGER
BEGEHREN
KLIMASCHUTZ

Solarthermie

Solarthermie nutzt die Strahlungsenergie der Sonne. Hierfür wird eine Flüssigkeit, die in den Solarthermiekollektoren zirkuliert, durch die Sonnenstrahlung erwärmt. Diese Wärme wird mittels eines Wärmeübertragers direkt genutzt oder an einen Speicher abgegeben. Die so abgekühlte Flüssigkeit wird anschließend in den Kollektoren wieder erwärmt. Die Solarwirtschaft rechnet mit einem gut erschließbaren Potenzial von ca. 100 TWh jährlicher Nutzwärme. Zum Vergleich: 2020 benötigte Deutschland 1.348 TWh Wärme.

Damit könnte die Solarthermie einen wichtigen Beitrag zur Deckung unseres Wärmebedarfs leisten. Eine Herausforderung besteht allerdings darin, dass der Wärmeertrag der Solarthermieanlagen im Sommer am größten ist, die meiste Wärme aber im Winter benötigt wird. Große saisonale Speicher sind deshalb notwendig, um die Wärmemengen aus dem Sommer im Winter nutzen zu können. Diese können dann mit einem Fernwärmenetz verbunden werden. Der Vorteil der Solarthermie ist ihr hoher Wirkungsgrad. So können 40-60 % der Sonnenenergie in nutzbare Wärme umgewandelt werden. Verluste entstehen hingegen bei der Speicherung der Wärme. In Dänemark wird diese Technologie bereits vielerorts in großem Maßstab kosteneffizient angewendet.



In Deutschland steht die Freiflächennutzung durch Solarthermie aufgrund der hohen Bevölkerungs- und Bebauungsdichte in starker Konkurrenz zu anderen Flächennutzungen wie Wohnbebauung oder Landwirtschaft. Allerdings werden auf ca. 16 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche Energiepflanzen angebaut. Sie haben einen deutlich größeren Flächenverbrauch als Solarthermie, so wird für die Erzeugung der gleichen Wärmemenge aus Biogas 43-mal so viel Fläche benötigt wie für Solarthermie. Trotzdem trägt Biomasse aktuell einen größeren Anteil an der Bereitstellung von erneuerbarer Wärme. Solarthermie könnte also möglicherweise auf Ackerflächen installiert werden, die momentan für Energiepflanzen genutzt werden. Auch eine kombinierte Nutzung von Solarthermie und Landwirtschaft wäre, ähnlich wie sie bei der Photovoltaik bereits Praxis ist, denkbar.

Für den Bau von Freiflächen-Solarthermie-Anlagen in einer Größenordnung von mehreren Quadratkilometern müssen die notwendigen Flächen identifiziert und für die solarthermische Nutzung und Speicherung verfügbar gemacht werden. Dies könnte eine Umwidmung bisher landwirtschaftlich genutzter Flächen im Flächennutzungsplan erfordern. Darüber hinaus müssen genehmigungsrechtliche und sicherheitstechnische Anforderungen hinsichtlich der großflächig bebauten Areale und der großen Speichermengen frühzeitig geprüft werden.

Praxisbeispiel Silkeborg in Dänemark

Seit 2016 ist in der dänischen Stadt Silkeborg die weltgrößte Solarthermie-Anlage in Betrieb. In nur sieben Monaten wurden über 12.000 Solarkollektoren errichtet. Mit 156.694 m^2 Kollektorfläche (knapp 22 Fußballfelder) und einer thermischen Spitzenleistung von 110 MWh erzeugt sie jedes Jahr circa 80.000 MWh Wärme. Dies entspricht dem Jahresverbrauch von 4.400 Einfamilienhäusern beziehungsweise 20 % des Wärmebedarfs in der Stadt mit rund 48.500 Einwohner*innen.

Um die ganzjährige Nutzung der Anlage zu ermöglichen, befinden sich insgesamt 64.000 m^3 Wasser in vier großen zylindrischen Wärmespeichern mit etwa 25 Metern Durchmesser, die die Wärme aufnehmen können. Ergänzend wird außerdem neben weiteren Quellen auch die Abwärme eines Rechenzentrums genutzt. Diese Wärme wird dann über die rund 600 km langen Verteilungsleitungen an die Anschlussleitungen und dann an die Haushalte verteilt. Je nach Jahreszeit wird das Netz mit 82 °C bzw. 47 °C im Vorlauf und 47 °C bzw. 12 °C im Rücklauf betrieben. Durch diese hohe Temperaturspreizung von 35 °C kann die Wärme effizient genutzt werden.

Während Dänemark schon früh auf Solarthermie setzte und die Technologie verbreitet ist, werden solche Anlagen auch in Deutschland immer gefragter. Die bislang größte deutsche Solarthermieanlage steht in Greifswald, wo Kollektoren auf vier Hektar ungefähr acht Gigawatt Wärme erzeugen. Bislang dient diese Wärme der Grundlast im Fernwärmenetz im Sommer, ein Speicher für den Winter soll gebaut werden. Die Kosten der Anlage betrugen knapp neun Millionen Euro. Sie ist damit eine von ca. 50 bereits in Betrieb befindlichen großen Solarthermieanlagen in Deutschland, weitere 50 sind in Planung oder im Bau.

Quellen und weitere Informationen:

- https://buerger-begehren-klimaschutz.de/wp-content/uploads/2021/10/Potenzialstudie_Berlin.pdf, S. 14f., S. 39
- https://www.solarwirtschaft.de/wp-content/uploads/2022/02/agenda_solarthermie_2022.pdf, S. 1
- https://www.bdew.de/media/documents/20220511_W%C3%A4rmeverbrauchsanalyse_Foliensatz_2022_final.pdf, S. 4
- https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/bund/position/solarthermie_position.pdf, S. 4
- https://www.landwirtschaft.de/landwirtschaft-verstehen/wie-arbeiten-foerster-und-pflanzenbauer/was-waechst-auf-deutschlands-feldern
- https://solarthermalworld.org/news/solar-thermal-shows-highest-energy-yield-square-metre/
- https://www.energynet.de/2017/01/11/grosse-solarthermie-anlagen-weltrekord/
- https://www.solarserver.de/2021/09/10/waermepumpe-ergaenzt-weltgroesste-solarthermie-anlage-in-silkeborg/
- https://taskforce.wiefm.eu/2019/09/20/fachexkursion-17-18-9-solarthermie-in-daenischen-fernwaerme-systemen/
- https://www.ndr.de/nachrichten/mecklenburg-vorpommern/Greifswald-Groesste-Solarthermieanlage-Deutschland-in-Betrieb,solarthermie116.html

Foto: Jens Clausen

BÜRGER BEGEHREN KLIMASCHUTZ

WÄRME.WISSEN.KOMPAKT.

Tiefe Geothermie

BÜRGER
BEGEHREN
KLIMASCHUTZ

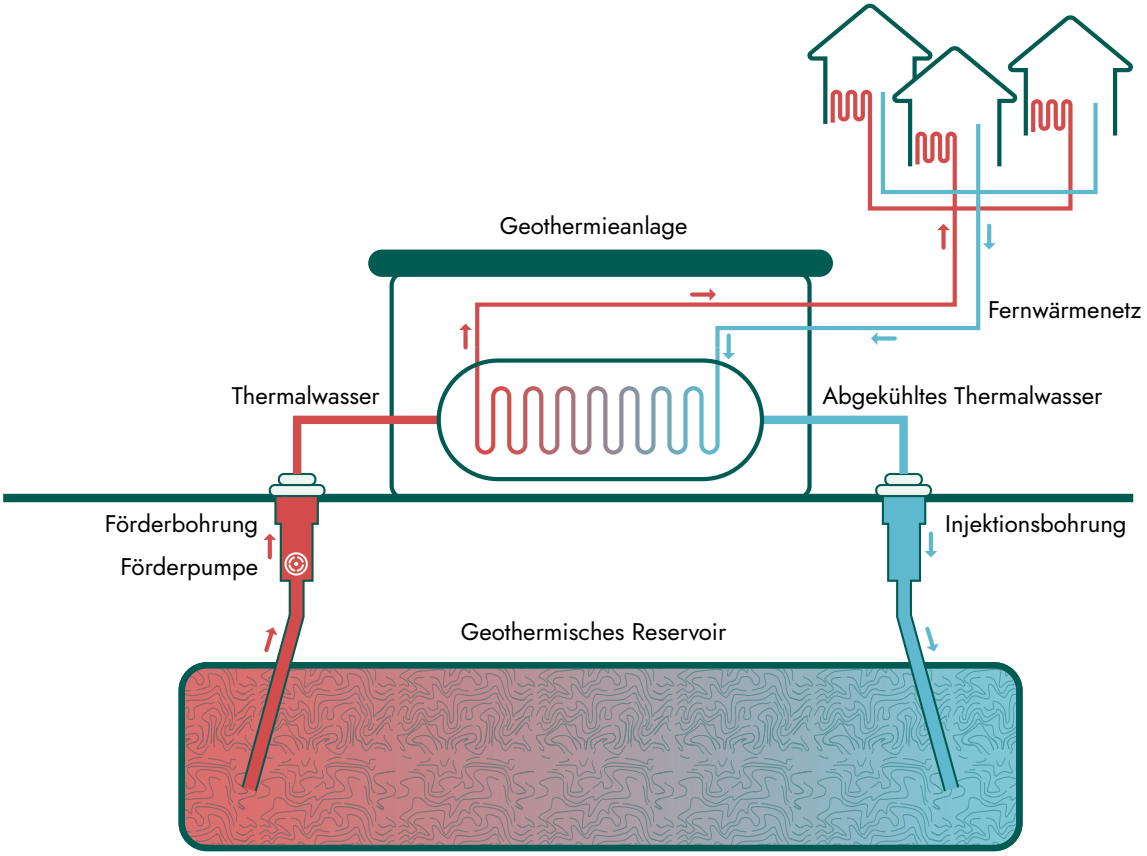
15

Tiefe Geothermie

Die Wärme der Erde (Geothermie) bietet enorme Potenziale für die Wärmeversorgung. Hierbei wird zwischen oberflächennaher und tiefer Geothermie differenziert. Oberflächennahe Geothermie (Erdsonden) beschreibt die Nutzung von Wärmequellen in bis zu 400 Metern Tiefe. Für die Versorgung von einzelnen Gebäuden kommen häufig Erdwärmesonden zum Einsatz, die vergleichsweise kostengünstig Erdwärme in bis zu 100 Metern Tiefen erschließen können. Tiefe Geothermie kann hingegen bis zu fünf Kilometer in die Erdschichten eindringen. In den ersten 100 Metern des Erdbodens liegt die Temperatur relativ konstant bei 10 °C. Bei jeden weiteren 100 Metern, die man in die Tiefe geht, steigt die Temperatur um etwa 3 °C.

Bei der tiefen Geothermie unterscheidet man konvektive Verfahren, bei denen die Wärme über Wasser oder Gase erschlossen wird, und konduktive Verfahren, welche die Wärmeleitung durch das Gestein nutzen. In Deutschland findet vor allem die hydrothermale Geothermie Anwendung (konvektives Verfahren). Hierbei wird heißes Thermalwasser aus tiefliegenden Gesteinsschichten an die Oberfläche befördert, um die darin enthaltene Wärmeenergie nutzbar zu machen. Das abgekühlte Wasser wird anschließend wieder in das Erdreich injiziert.

Die geothermischen Potenziale sind zwar stark standortabhängig, könnten aber einen hohen Beitrag zur Deckung des Wärmebe-



darfs leisten. Schätzungen gehen davon aus, dass durch hydrothermale Geothermie in bis zu vier Kilometern Tiefe circa 25% des deutschen Wärmebedarfs gedeckt werden könnte. Ähnlich werden die Potenziale der oberflächennahen Geothermie beziffert. Momentan werden in Deutschland aber lediglich 1,5% des Wärmebedarfs durch Geothermie gedeckt.

Aussagen über regionale geologische Potenziale können im Vorfeld allerdings nur indirekt aus geophysikalischen Daten erschlossen werden. Die Region um München gilt als Hotspot der tiefen Geothermie in Deutschland. Dort stehen die meisten Geothermie-Kraftwerke und es gibt, bedingt durch die geografischen Gegebenheiten des Molassebeckens, ein großes bekanntes Geothermiepotenzial. Auch in anderen Regionen Deutschlands wie im Norddeutschen Becken oder in Nordrhein-Westfalen gibt es große Potenziale, die jedoch bisher kaum genutzt werden.

Die Erschließung geothermischer Potenziale bietet für die Wärmewende viele Vorteile. Geothermisch erzeugte Wärme weist eine relativ hohe Quelltemperatur auf und steht ohne Speicher und unabhängig von klimatischen und Wetterbedingungen ganzjährig zur Verfügung. Je nach Tiefe der Bohrung und der so geförderten Quelltemperatur ist ein Anheben des Temperaturniveaus mittels Hochtemperatur-Wärmepumpe nötig, um eine Einspeisung in ein Fernwärmenetz zu ermöglichen.

Die konkrete Eignung eines Standorts kann hierbei ausschließlich über bohrtechnische Aufschlüsse sichergestellt werden. Diese verbleibende Unsicherheit vor der Probebohrung wird als Fündigkeitsrisiko bezeichnet und stellt oft ein Hemmnis bei der Finanzierung teurer Erstbohrungen dar. Dieses Fündigkeitsrisiko kann beispielsweise durch eine Bürgschaft des Landes abgesichert werden. Zudem sind detaillierte Überprüfungen der berg-, wasser- und umweltschutzrechtlichen Anforderungen erforderlich, beispielsweise hinsichtlich der Einflussnahme auf Wasserschutzgebiete.

Praxisbeispiel München

Die Region rund um München eignet sich aufgrund der geologischen Voraussetzungen hervorragend für die Wärmeversorgung durch Geothermie. Circa 3 Kilometer unter München verläuft eine Kalksteinschicht, die heißes Wasser enthält, ein sogenannter Thermalwasserleiter. Die Stadtwerke München investieren viel, um diese Wärme zu erschließen und für das wachsende Fernwärmenetz nutzbar zu machen. Bereits jetzt betreiben die Stadtwerke München fünf Geothermieanlagen in der Region. Bis 2030 wollen die Stadtwerke 1 Mrd. Euro in geothermische Aquiferspeicher investieren.

Ein ehrgeiziges Projekt entsteht momentan am Münchner Heizkraftwerk Süd. Dort soll das größte deutsche Geothermiekraftwerk mit sechs Bohrungen in 2.400 bis 3.200 Meter Tiefe gebaut werden. Bei einer geplanten Leistung von mindestens 50 MW kann das Kraftwerk erneuerbare Fernwärme für etwa 80.000 Personen bereitstellen. Dafür wird das heiße Wasser mittels Pumpen gefördert und in das Kraftwerk gepumpt. Über einen Wärmetauscher gelangt die Energie dann ins Heizwasser, das abgekühlte Thermalwasser wird unverändert über ein weiteres Bohrloch wieder in den Untergrund zurückgepumpt. Dabei können etwa 40 % der Wärme entnommen werden.

Ergänzt werden soll das Kraftwerk um einen großen Wärmespeicher. Geplant ist ein 45.000 m^3 großer Tank, in dem durch heißes Wasser etwa 2000 MWh Energie gespeichert werden. Damit kann die im Sommer geförderte Wärme für den Winter nutzbar gemacht werden. Die Inbetriebnahme ist für Mitte 2025 geplant.

Quellen und weitere Informationen:

- https://buerger-begehren-klimaschutz.de/wp-content/uploads/2021/10/Potenzialstudie_Berlin.pdf, S. 18f.
- https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Technologien/Geothermie/geothermie.html
- https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/geothermie-boom-101.html

BÜRGER BEGEHREN KLIMASCHUTZ

WÄRME.WISSEN.KOMPAKT.

Abwasser-Wärmepumpen

BÜRGER
BEGEHREN
KLIMASCHUTZ

Abwasser-Wärmepumpen

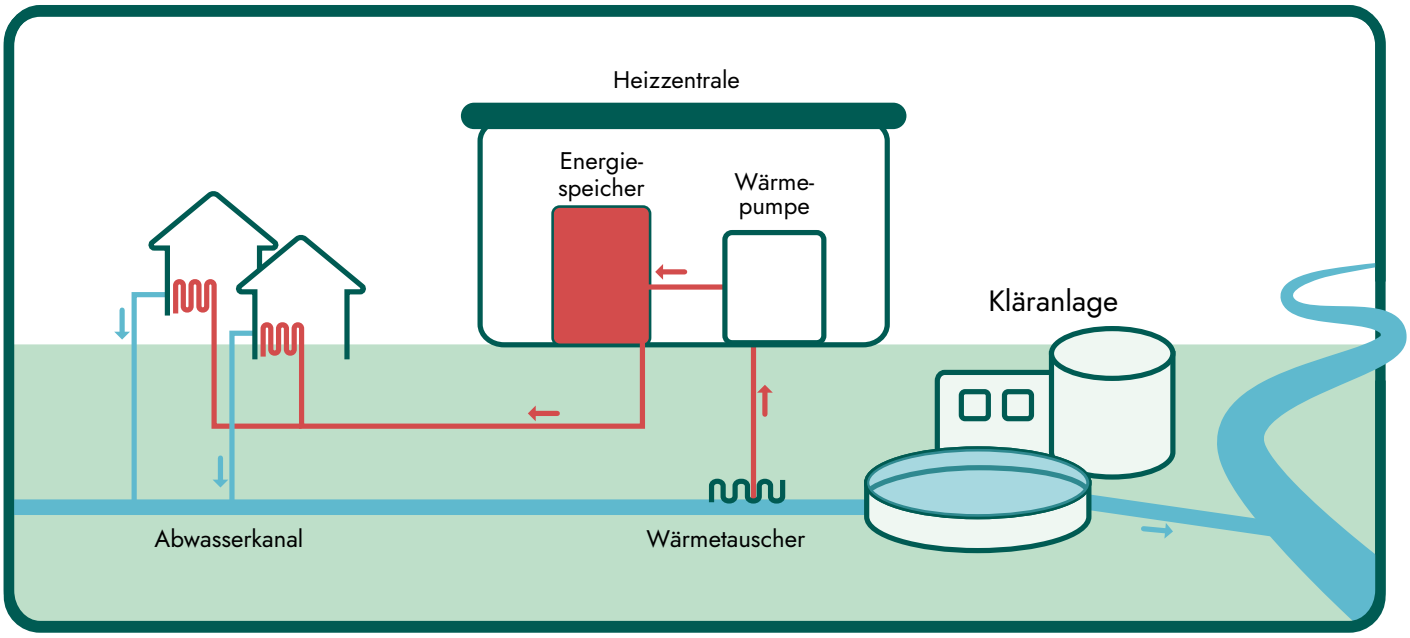
Abwasser fällt in der Form von Niederschlagswasser sowie häuslichem und betrieblichem Schmutzwasser an. Letzteres verfügt während der Heizperiode über Temperaturen von 10-15 °C und bietet sich damit auch im Winter als Wärmequelle an. Um diese Restwärme nutzbar zu machen, werden Wärmetauscher entweder im ungereinigten Wasser, in der Kläranlage selbst oder im gereinigten Wasser verbaut. Die entnommene Wärme wird anschließend mittels Wärmepumpe auf das benötigte Temperaturniveau angehoben. Dies kann entweder dezentral oder in Heizzentralen passieren. Die Wärmeentnahme aus dem Abwasser ist dabei nicht uneingeschränkt, da das Abwasser am Eintritt zur Kläranlage eine Temperatur von 8 °C nicht unterschreiten darf, damit die Faulungsprozesse in den Kläranlagen weiterhin effizient ablaufen können.

Die Schätzungen über das technische Potenzial der Wärmenutzung aus Abwasser gehen weit auseinander und schwanken zwischen 4,8 und 101 TWh. In einer räumlich hochaufgelösten Potenzialabschätzung geht eine Untersuchung des ifeu-Instituts von einem technisch-ökonomischen Potenzial von 21,7-32,7 TWh Nutzwärme aus.

Zum Vergleich: 2019 lag der Raumwärmebedarf bei 658 TWh pro Jahr und der Warmwasserbedarf bei 130 TWh pro Jahr.

Insbesondere in großen Städten, in denen Abwasseraufkommen und Wärmebedarf räumlich dicht beieinander liegen, können über das Abwasser große Wärmemengen erschlossen werden. In Berlin beispielsweise haben die Berliner Wasserbetriebe einen Abwasserwärmeatlas entwickelt. Nach Informationen der Berliner Stadtwerke ergibt sich hieraus ein Gesamtpotenzial von 250-300 MW, welches über knapp 600 km Rohrlänge nutzbar gemacht werden kann. Damit lassen sich ungefähr 5 % des Berliner Wärmebedarfs decken.

Zur Nutzung der Restwärme des Abwassers steht an erster Stelle die Identifikation und Quantifizierung der entsprechenden Potenziale beispielsweise im Rahmen eines Abwasserwärmeatlasses. Weitere Untersuchungen können erörtern, welches technische Konzept und welche Standorte für die Nutzung dieser Potenziale zur Fernwärmeversorgung optimal sind.



Praxisbeispiel Wien

Während in Berlin bereits wichtige Vorarbeiten zur Nutzung der Abwasser-Restwärme geleistet wurden, sind bislang erst einige Modellprojekte tatsächlich in der Umsetzung. Hamburg arbeitet derweil daran, am Hamburger Klärwerk die erste Großwasserwärmepumpe Deutschlands zu bauen.

Noch ambitionierter sind die Pläne der Stadt Wien. Bislang heizt dort die Hälfte der Haushalte mit einer Gastherme. Um die Vorgabe Österreichs, bis 2040 klimaneutral zu sein, zu erfüllen, sollen viele dieser Haushalte an die Fernwärme angeschlossen werden. Die ist allerdings bislang noch alles andere als grün. Damit sie dann als klimaneutrale Alternative zur Verfügung steht, sollen in Wien Europas größte Wärmepumpen entstehen. Diese nutzen die Restwärme aus dem Abwasser. Aufgrund der hohen Bebauungsdichte und der entsprechend hohen Abflusswerte bietet sich diese Energiequelle an. Grundlage für die Erschließung ist das Abwasserwärmekataster. Es stellt die thermisch nutzbaren Kanalabschnitte des 2500 km langen Kanalnetzes dar.

Zur Umsetzung dieses ambitionierten Projekts werden zurzeit sechs Wärmepumpen im Wiener Stadtteil Simmering gebaut, drei davon sollen bereits Ende 2023 in Betrieb gehen. Sie sollen bis zu 6 °C aus dem Abwasser holen und ins Fernwärmenetz einspeisen. Wärmetauscher und Kompressoren heben das Temperaturniveau dann auf 90 °C, die im Wiener Fernwärmenetz benötigt werden. Die Dimensionen sind gigantisch: ungefähr 200 Tonnen wiegen die Wärmepumpen, durch alle sechs werden dann sekündlich 5.000 Liter geklärtes Abwasser strömen. Sie können dann über 100.000 Haushalte versorgen. Der dafür benötigte Strom soll aus dem Wasserkraftwerk Freudenau kommen. Die Investitionskosten liegen bei rund 70 Millionen Euro.

Dies ist aber nur eine Säule der Wiener Fernwärmeversorgung. Neben industrieller Abwärme soll auch Geothermie erschlossen und eingespeist werden.

Quellen und weitere Informationen:

- https://buerger-begehren-klimaschutz.de/wp-content/uploads/2021/10/Potenzialstudie_Berlin.pdf, S. 19, S. 40
- https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/ifeu-bmu_Abwaermepotenzial_Abwasser_final_update.pdf, S. 2f., S. 9, S. 12
- https://www.ieg.fraunhofer.de/content/dam/ieg/documents/Roadmap%20Tiefe%20Geothermie%20in%20Deutschland%20FhG%20HGF%2002022022.pdf, S. 14
- https://www.bwb.de/de/heizen-und-kuehlen-mit-abwasser.php
- https://www.hamburger-energiewerke.de/wissen-themen/abwaermenutzung/abwasserabwaerme
- https://www.data.gv.at/katalog/dataset/48491097-8723-4f5a-8edf-ed55ea46a150
- https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/energie/themenstadtplan/abwasserwaerme/
- https://www.derstandard.de/story/2000143180017/europas-groesste-waermepumpe-holt-energie-aus-wiens-abwasser

BÜRGER
BEGEHREN
KLIMASCHUTZ

WÄRME.WISSEN.KOMPAKT.

Abwärme aus Rechenzentren

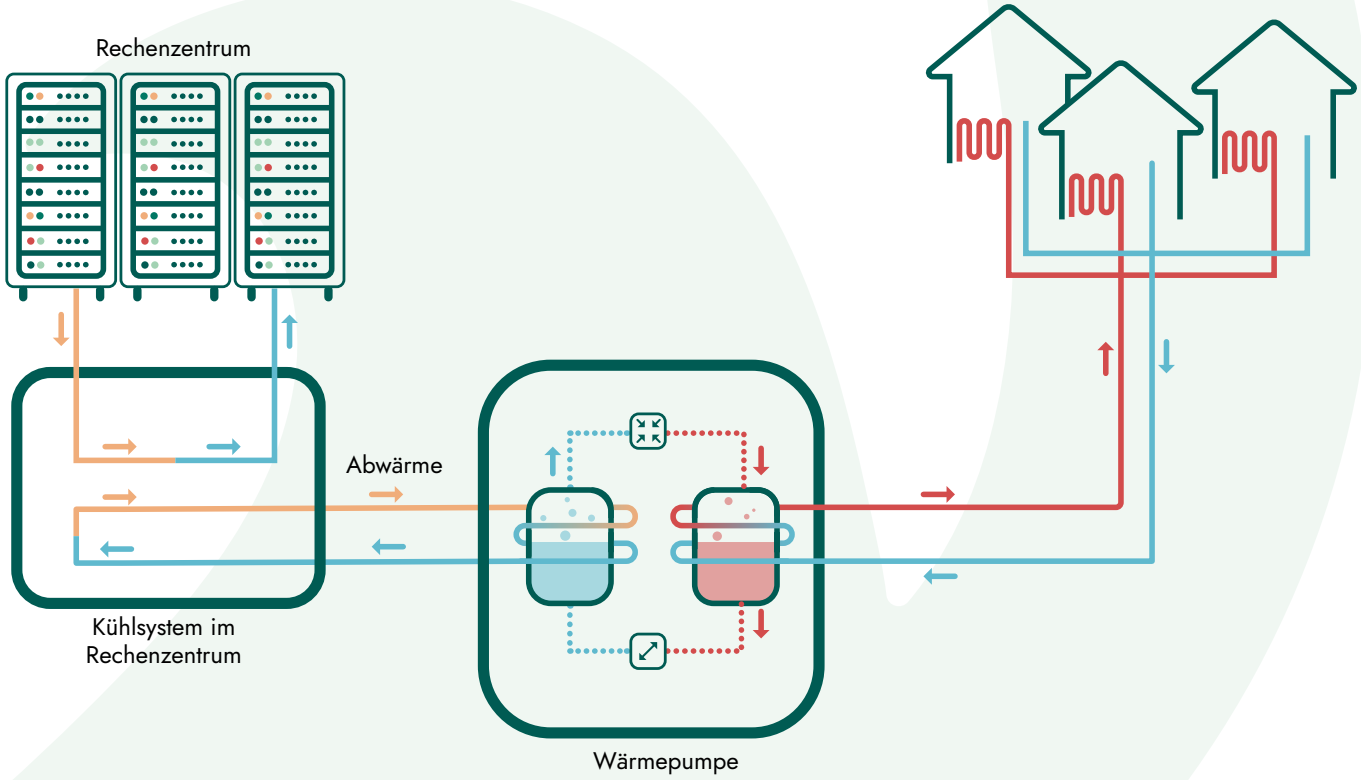
BÜRGER
BEGEHREN
KLIMASCHUTZ

23

Abwärme aus Rechenzentren

Rechenzentren nutzen große Mengen an Energie in Form von Strom. 2020 waren es in Deutschland 16 Mrd. kWh elektrischen Stroms. Zum Vergleich: das ist mehr als der Strombedarf der Stadt Berlin. Der hohe Stromverbrauch der Rechenzentren resultiert aus dem Strombedarf der Server, Speicher und Netzwerke sowie weiterer für den Betrieb notwendiger Infrastruktur, wie zum Beispiel Kühlung, unterbrechungsfreie Stromversorgung, Brandschutzeinrichtung oder Beleuchtung. Die Informations- und Kommunikationstechnik setzt im Betrieb den Strom zu Wärme um, welche über ein Kühlsystem abgetragen wird. Damit wird die Überhitzung der Geräte verhindert. Diese Abwärme ließe sich beispielsweise für die Fernwärmebereitstellung gut nutzen. Bislang geschieht das aufgrund von organisatorischen Herausforderungen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen jedoch nur in den wenigsten Fällen.

Ein Vorteil der Abwärmenutzung von Rechenzentren ist, dass hier im Vergleich zu Umweltwärmepotenzialen auch im Winter mit 25-30 °C recht hohe Quelltemperaturen zur Verfügung stehen. Diese müssen dann mittels Wärmepumpe auf das benötigte Temperaturniveau angehoben werden. Die Erschließung dieser Potenziale setzt die Offenheit der Betreiberfirmen für die technische Umsetzung und langfristige Lieferverträge voraus. Wird eine Wärmeabnahme des Fernwärmenetzes hingegen bereits in Planungsphase berücksichtigt, ist dies für beide Seiten grundsätzlich wirtschaftlich vorteilhaft. Gerade beim Neubau von Rechenzentren ist es deshalb wichtig, die Abwärmenutzung gleich einzuplanen. Aufgrund der fortschreitenden Digitalisierung auch im Zuge der Sektorenkopplung ist hier mit weiterem Zuwachs zu rechnen. Zwischen 2016 und 2021 stiegen die Kapazitäten um 30 %, bis zum Jahr 2025 wird im Vergleich zum Jahr 2021 ein weiterer Anstieg von 20 %



erwartet. 2022 gab es in Deutschland mehr als 3.000 große Rechenzentren, die Gesamtzahl der Rechenzentren und IT-Installationen liegt sogar bei über 50.000. Dies ist schon jetzt ein enormes Potenzial. So könnten heute 10 % des Wärmebedarfs des Rechenzentrum-Hotspots Frankfurt am Main durch Abwärme gedeckt werden, perspektivisch wäre sogar die vollständige Versorgung aller Wohngebäude Frankfurts möglich.

Heißwasserkühlung

Bei der Luftkühlung von Rechenzentren stehen Abwärmetemperaturen von 25-30 °C zur Verfügung. Damit diese Wärme für das Fernwärmenetz nutzbar wird, muss sie in der Regel zunächst mittels Wärmepumpe auf ein höheres Temperaturniveau gebracht werden. Anders ist das bei der Heißwasserkühlung.

Heißwasserkühlung ist effizienter als Luftkühlung und wird schon heute in vielen Serversystemen eingesetzt. Für die Wärmeerzeugung hat sie den Vorteil, dass Wasser auf einem Temperaturniveau von 60 °C zur Verfügung gestellt werden kann. Für viele Anwendungen kann dann auf das Nachheizen mittels Wärmepumpe verzichtet werden.

Abwärme aus Rechenzentren kann dann effizient und wirtschaftlich genutzt werden, wenn die Nutzung bereits bei der Planung des Rechenzentrums berücksichtigt wird. Aus diesem Grund sind frühzeitige Gespräche bei der Ansiedlung und Planung von Rechenzentren wichtig, um eine Kooperation mit dem Fernwärmebetreiber zu ermöglichen. Um dies sicherzustellen, sollte eine Prüfung zur Einbindung der Abwärme in das Wärmenetz für neue Rechenzentren Bestandteil des Genehmigungsverfahrens werden.

Praxisbeispiel Stockholm, Greifswald und Braunschweig

In Skandinavien wird viel Fernwärme genutzt. In vielerlei Hinsicht lohnt sich deshalb der Blick dorthin, da viele Ansätze zur Einbindung erneuerbarer Energien und Abwärme dort bereits in größerem Maßstab erprobt werden. In Stockholm beispielsweise arbeitet man schon seit mehreren Jahren an einer ehrgeizigen Idee. Bis 2035 sollen 10 % der Haushalte mit der Abwärme der Rechenzentren beheizt werden. Perspektivisch könnte die Abwärme aus Rechenzentren dann die Haushalte von über 900.000 Menschen wärmen. Die Grundlage für dieses ambitionierte Projekt ist die Kooperation der Stadt Stockholm mit dem Unternehmen Stockholm Data Parks.

In Deutschland sind die Dimensionen bislang noch kleiner. Geplant als Deutschlands modernstes Rechenzentrum eröffnete 2021 ein neues Rechenzentrum unweit der Universität Greifswald. 1.700 m² groß bietet es ausreichend Platz für Rechner, Server, Verwaltungs-

und Seminarräume. Die Kühlung erfolgt sowohl über Luft als auch über Heißwasser, was die Nutzung der Wärme für die Beheizung erleichtert. Wird die Wärme im Sommer nicht benötigt, kann sie an die Außenluft abgegeben werden. Im Winter heizt die Abwärme die angeschlossenen Verwaltungs- und Seminarräume. Überschüssige Wärme wird über ein kleines Netz an das benachbarte Forschungsgebäude abgegeben. Gefördert wurde das ambitionierte Projekt, dessen Kosten bei ungefähr 10 Millionen Euro lagen, aus den Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung.

Dass die Nutzung der Rechnerabwärme auch bei Wohngebäuden funktioniert, zeigt das Beispiel Braunschweig. Dort wird die Abwärme des Rechenzentrums der Volkswagen Financial Services AG genutzt, um 400 Wohnungen und ein Gewerbegebiet mit Wärme zu versorgen. Ermöglicht wurde dies durch die Zusammenarbeit mit dem regionalen Energieversorger BS|Energy und Veolia. Der Energieversorger sorgte für den Anschluss der Wohneinheiten an die Fernwärme, die über eine Nahwärmestation bereitgestellt wird. Das Rechenzentrum liefert 25 °C warmes Wasser, das anschließend mittels Wärmepumpe auf das benötigte Temperaturniveau angehoben wird. Etwa 730 MWh werden dadurch jährlich von dem Rechenzentrum an das Fernwärmenetz abgegeben.

Quellen und weitere Informationen:

- https://buerger-begehren-klimaschutz.de/wp-content/uploads/2021/10/Potenzialstudie_Berlin.pdf, S. 20
- https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2020/09/Abwaermenutzung_Rechenzentren_2020.pdf, S. 4
- https://www.bitkom.org/sites/main/files/2022-02/10.02.22-studie-rechenzentren.pdf, S. 8
- https://www.lanline.de/datacenter/heiss-kuehlt-besser.254539.html
- https://w.media/energy-companies-in-sweden-aims-to-recycle-heat-from-data-centers/
- https://www.bbc.com/future/article/20171013-where-data-centres-store-info—and-heat-homes
- https://www.ostsee-zeitung.de/lokales/vorpommern-greifswald/greifswald/deutschlands-modernstes-rechenzentrum-AXVXY4G26BHXZWZNZCPWSJTUGA.html
- https://www.hoval.de/de_DE/Universit%C3%A4t-Greifswald-setzt-bei-Rechenzentrum-auf-nachhaltige-K%C3%BChlung/reference/rechenzentrum-kuehlung-adiabatik
- https://www.datacenter-insider.de/rz-abwaerme-versorgt-400-wohnungen-a-816813/
- https://www.future-thinking.de/einreichungen/lieferung-von-kaelte-gegen-waerme-vom-regionalen-fernwaermeanbieter/

Foto: Taylor Vick auf Unsplash

BÜRGER BEGEHREN KLIMASCHUTZ

WÄRME.WISSEN.KOMPAKT.

Industrielle Abwärme

BÜRGER
BEGEHREN
KLIMASCHUTZ

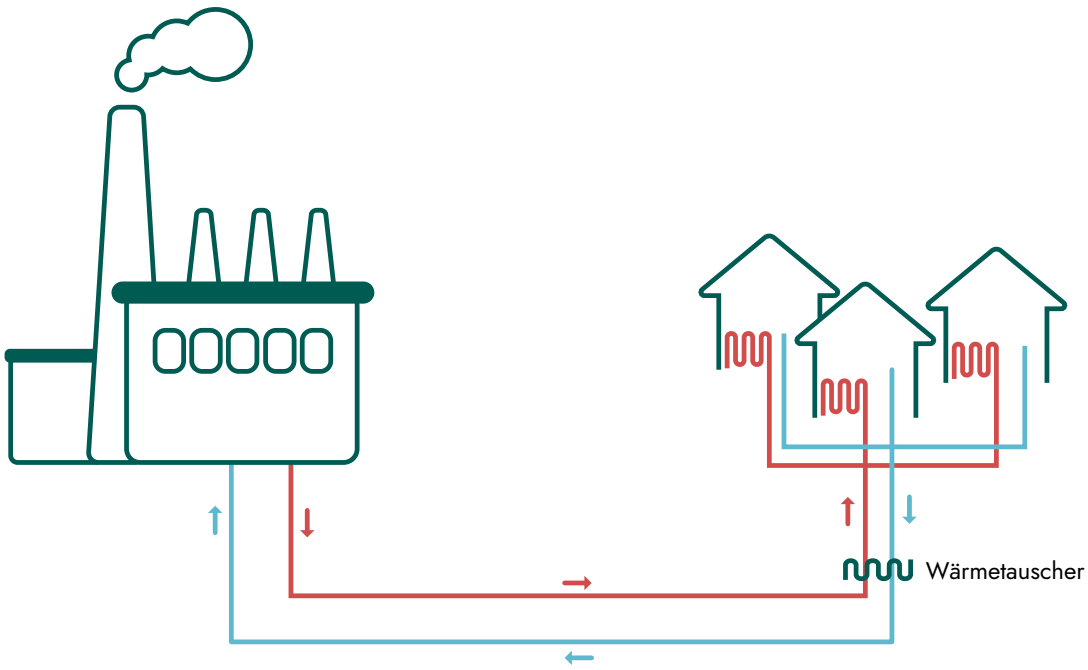
Industrielle Abwärme

Viele industrielle Prozesse benötigen Wärme in Form von Prozesswärme. Oft entsteht dabei Abwärme, die nicht weiter genutzt werden kann. Diese wird häufig dann als klimaneutrale Wärme bezeichnet, wenn sie ohne zusätzlichen Einsatz von Brennstoffen bereitgestellt werden kann. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass zur Erzeugung der Prozesswärme oftmals fossile Energieträger eingesetzt werden. Vor der Nutzbarmachung dieser Abwärme für die Wärmeversorgung steht also die Hebung von Effizienz- und Elektrifizierungspotenzialen sowie ein Umstieg auf erneuerbare Energie. Die verbleibende, unvermeidbare Abwärme kann dann in ein Wärmenetz eingespeist werden. Besonders hoch sind diese Potenziale in Betrieben mit Hochtemperatur-Anwendungen (> 400 °C). Stahl-, Zement- und Aluminiumwerke oder ähnliche Industrien bieten sich demnach besonders an.

Bislang verpufft ein großer Teil der Abwärme ungenutzt. Da Industrieprozesse sehr unterschiedlich ablaufen, sind Schätzungen über die tatsächlichen Potenziale schwierig. Oftmals sind sie in den Unternehmen selbst gar nicht bekannt. Eine umfassende Potenzialstudie ermittelt aus 360 TWh Brennstoffeinsätzen und 30 TWh thermisch relevanten Prozessstromeinsätzen ein theoretisch nutzbares Abwärmepotenzial von 63 TWh. In bestehenden Fernwärmenetzen ergibt sich daraus ein technisches Potenzial von 11-13 TWh. Betrachtet man auch die zukünftigen Netzpotenziale steigt es auf 23-29 TWh.

Um diese Potenziale vor Ort heben zu können, muss individuell geprüft werden, welche Wärmemenge auf welchem Temperaturniveau zur Verfügung steht und wie diese technisch ausgekoppelt werden kann. Nicht immer liegen die Potenziale kontinuierlich vor, so dass auch die Aufnahme großer Wärmemengen in kurzer Zeit eine Herausforderung sein kann. Auch das Temperaturniveau der Abwärme ist sehr unterschiedlich. Lässt sich Abwärme von Hochtemperaturprozessen ohne weitere Temperaturanhebung in das Wärmenetz einspeisen, ist bei Abwärme von Kühlprozessen oder anderen Niedertemperatur-Abwärmequellen oft der Einsatz einer zusätzlichen Wärmepumpe notwendig, um das Temperaturniveau des Fernwärmenetzes zu erreichen.

Um Abwärme nutzbar zu machen, müssen zunächst mögliche Abwärmequellen identifiziert und die Möglichkeiten der Auskopplung der Wärme geprüft werden. Häufig stehen Industrieanlagen etwas außerhalb der Bebauungen, die Wärme muss also mittels Trassen zu den Wärmesenken transportiert werden. Ihr Bau ist oftmals mit längeren Genehmigungsverfahren und entsprechenden Investitionen verbunden. Die gemeinsame Betrachtung des Anschlusses mehrerer Erzeugungsanlagen bietet mögliche Synergieeffekte bei der Erschließung.



Praxisbeispiele Hamburg und Rheinfelden

Gemessen am Umsatz ist Hamburg der größte Industriestandort Deutschlands. Hier lohnt sich deshalb der Blick auf die Abwärmepotenziale besonders. Das Unternehmen Wärme Hamburg hat sich zum Ziel gesetzt, diese Potenziale für die Fernwärme zu nutzen. 2017 gaben der Metallproduzent Aurubus und enercity bekannt, die östliche HafenCity in Hamburg mit Wärme aus Abwärme versorgen zu wollen. Genutzt wird dafür vor allem die Abwärme mit einer Temperatur von unter 100 °C, für die es im Kupferwerk selbst keine Verwendung gibt. Die HafenCity ist ein Neubaugebiet mit einer Nutzfläche von 1,4 Millionen Quadratmetern, was knapp 20.000 durchschnittlich großen Wohnungen entspricht. Sie sollen durch eine Fernwärmeleitung mit dem Werk verbunden werden. Rund ein Drittel der Kosten für den Umbau der Prozesse und der internen Wärmeleitung wird durch die KfW gefördert. Insgesamt liegen die Kosten bei ca. 16 Mio. Euro. 2021 unterzeichneten die Stadt Hamburg und Aurubus einen langfristigen Wärmeliefervertrag für die Versorgung von rund 20.000 Haushalten ab der Heizperiode 2024/2025.

Etwas kleiner ist das Projekt in Rheinfelden. Dort versorgen der Chemiekonzern Evonik und NaturEnergie 10.000 Haushalte und ein Gewerbegebiet mit industrieller Abwärme. Da Evonik nicht die gesamte genutzte Wärme wieder dem Produktionskreislauf zuführen kann, wird sie über eine 900 Meter lange Rohrleitung zur Energiezentrale geleitet. Dort wird das 95 °C warme Wasser über die gekoppelten Nahwärmenetze der NaturEnergie und den Stadtwerken Rheinfelden weiter verteilt oder über einen Wärmetauscher und mittels Kleinstdampfturbinen in elektrische Energie umgewandelt. Das Besondere an diesem Projekt: wenn der Wärmebedarf im Sommer geringer ist, wird aus der überschüssigen Wärme mittels Wärmetauscher und Kleinstdampfturbinen Strom gewonnen.

Quellen und weitere Informationen:

- https://buerger-begehren-klimaschutz.de/wp-content/uploads/2021/10/Potenzialstudie_Berlin.pdf, S. 21, S. 40
- https://www.kowa-projekt.de/wp-content/uploads_kowa/2021/12/20211125__KoWa_Vortrag_Themenabend_v-Web.pdf, Folie 15
- https://www.industrie-energieforschung.de/projekte/de/abwaermeatlas_ungenutzte_waermeenergie_industrie
- https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Schlussbericht_EnEffW%C3%A4rme-NENIA.pdf, S. 135-136
- https://www.hamburger-energiewerke.de/wissen-themen/abwaermenutzung/industrieabwaerme
- https://www.dena.de/newsroom/industrieabwaerme/
- https://waerme.hamburg/presse-media/pressemitteilungen/aurubis-ag-und-waerme-hamburg-gmbh-bauen-groesste-industriewaermeversorgung-deutschlands-weiter-aus
- https://www.naturenergie.de/waerme/referenz-evonik

BÜRGER
BEGEHREN
KLIMASCHUTZ

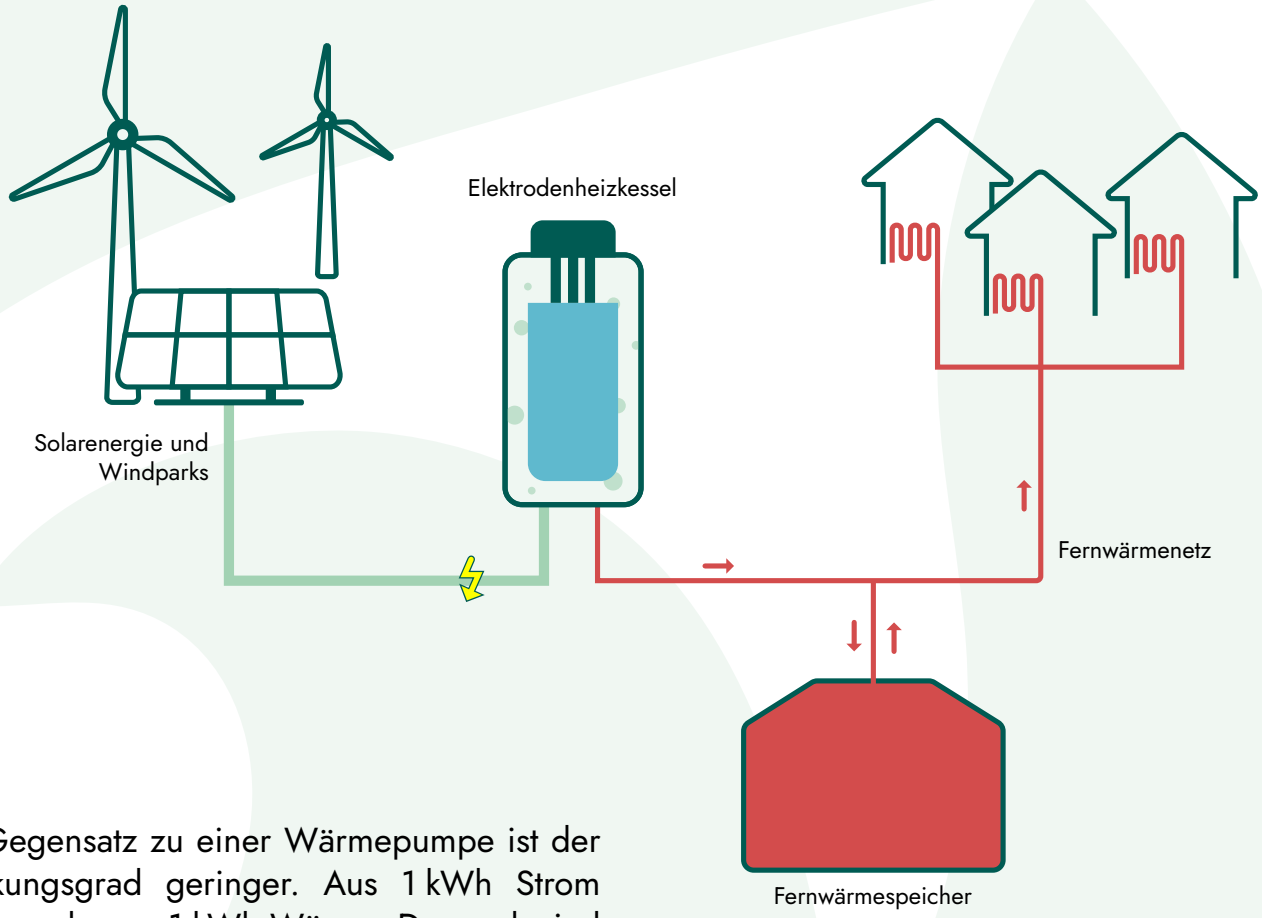
WÄRME.WISSEN.KOMPAKT.

Power-to-Heat

BÜRGER
BEGEHREN
KLIMASCHUTZ

Power-to-Heat

Strom ist Bestandteil vieler Modelle nachhaltiger Wärmeversorgung. Die Hauptanwendung sind Wärmepumpen, die dazu dienen, das Temperaturniveau der verwendeten Umwelt- oder Abwärme auf das benötigte Temperaturniveau anzuheben. Abhängig von der Höhe von Ausgangstemperatur und benötigter Temperatur ist dieser Prozess sehr effizient: so können mit einer kWh Strom 2,5-5 kWh Wärme produziert werden.
Im Unterschied dazu bezeichnet Power-to-Heat die direkte Nutzung von Strom zur Wärmeerzeugung. Hierfür bietet sich in großen Erzeugungsanlagen die Technik eines Elektrodenheißwasserkessels an. Vorstellen kann man sich diese Technologie wie einen großen Tauchsieder. Es handelt sich dabei um ein Elektrolyseverfahren, bei dem eine elektrische Wechselspannung in den Kesseln angelegt wird. Anders als in einem mit Gleichstrom betriebenen Elektrolyseur wird dabei kein Wasserstoff abgespaltet, sondern es kommt lediglich zu einer rein elektrischen Widerstandsbeheizung des Wassers.



Im Gegensatz zu einer Wärmepumpe ist der Wirkungsgrad geringer. Aus 1 kWh Strom wird nur knapp 1 kWh Wärme. Dennoch sind Power-to-Heat-Anlagen ein Baustein der zukünftigen Wärmeversorgung. Sie haben den Vorteil, dass sie kostengünstig, vergleichsweise kompakt und flexibel regelbar sind. Darüber hinaus können sie eine große Wärmeleistung umsetzen, um sie ins Fernwärmenetz einzuspeisen. Entscheidend ist aber vor allem ihr Beitrag zur Stabilisierung des Stromsystems.

Durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung in Deutschland nimmt auch die Fluktuation der Stromeinspeisung zu. Die erneuerbaren Stromquellen richten ihre Einspeisung nicht nach dem Strombedarf der Verbraucher, sondern sind wetterabhängig. Dies führt dazu, dass zeitweise deutlich mehr Strom in die Netze eingespeist wird, als zur gleichen Zeit verbraucht wird. Statt den wertvollen erneuerbaren Strom abzuregeln, kann er von Power-to-Heat-Anlagen aufgenommen und als Wärme gespeichert werden. Da Strom vor allem im Gegensatz zu Wärme eine sehr hochwertige Energieform ist, sollte sich der Einsatz von Power-to-Heat auf die Verwendung von Überschussstrom aus erneuerbaren Energien beschränken. Im Rahmen eines Wärme-Transformationskonzepts stehen diese elektrischen Überschussleistungen in Konkurrenz zu regenerativen, energieeffizienteren Wärmeerzeugern. Eine Flexibilisierung des Stromsektors kann dabei auch durch eine Vielzahl an Groß-Wärmepumpen in Verbindung mit umfassenden Speicherkapazitäten erfolgen.

Die Frage, welche Rolle Power-to-Heat-Anlagen bei der zukünftigen Wärmeversorgung spielen, ist also insbesondere von zwei Faktoren abhängig: dem Ausbau der erneuerbaren Energien und daraus abgeleitet dem verfügbaren Überschussstrom und den zur Verfügung stehenden, möglicherweise effizienteren alternativen Nutzungsmöglichkeiten für Überschussstrom.

Bereits jetzt werden erneuerbare Energien zur Stabilisierung der Netze abgeregelt. Im ersten Halbjahr 2022 waren es 5,4 TWh. Dieser Strom fällt regional sehr unterschiedlich an. Bei dieser Strommenge ist zudem zu bedenken, dass in diesem Zeitraum weiterhin fossile Erzeugungsanlagen am Stromnetz waren. Denn im gleichen Zeitraum lag der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung nur bei 49 %. Schätzungen für das Jahr 2035 gehen von jährlich zur Verfügung stehendem Überschussstrom in der Höhe von 20 TWh aus.

Aufgrund der besonderen Rolle von Power-to-Heat-Anlagen an der Schnittstelle zwischen Strom und Wärme müssen die Potenziale für den Einsatz der Anlagen fortlaufend neu bewertet werden. Insgesamt ist davon auszugehen, dass Power-to-Heat-Anlagen insgesamt keine zentrale Rolle bei der Wärmebereitstellung spielen werden. Regional können sie jedoch für einen gewissen Zeitraum ein wichtiger Baustein zur Nutzung von erneuerbarem Strom sein.

Praxisbeispiel „Nutzen statt Abregeln“

Aufgrund bestehender Netzengpässe kann erneuerbarer Strom, meist Windstrom von der Küste, zeitweise nicht vollständig abtransportiert werden. Um eine Abregelung des erneuerbaren Stroms zu vermeiden, entstanden in Kooperation mit dem Übertragungsnetzbetreiber 50Hertz zwei Power-to-Heat-Anlagen in Mecklenburg-Vorpommern und in Hamburg. Betrieben werden sie jeweils gemeinsam von den Stadtwerken Parchim beziehungsweise der Getec und 50Hertz. An beiden Standorten wurden Elektrodenkessel gebaut, die mit den bestehenden Blockheizkraftwerken gekoppelt wurden. Kommt es zu einem Überangebot an Strom aus den Windparks auf dem Meer oder an Land, ersetzen sie die konventionellen Anlagen. Dies ist möglich, weil 50Hertz als Netzbetreiber vollen Zugriff auf die Anlagen hat und sie systemdienlich zur Netzsteuerung nutzen kann. So kann das Stromsystem entlastet werden. Dieses Verfahren bietet mehrere Vorteile: Erneuerbarer Strom muss nicht abgeregelt werden, Kosten für das Abregeln und Vergüten von EEG-Anlagen entfallen und die Nutzer*innen werden mit grüner Wärme versorgt.

Möglich wurde das Projekt durch Kooperationsverträge zwischen 50Hertz und den lokalen Wärmeversorgern auf Grundlage der 2017 erfolgten Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes. Diese ermöglicht Übertragungsnetzbetreibern mit Betreibern von Kraftwärmekopplungs-Anlagen (KWK-Anlagen) Verträge über Bau und Betrieb von Power-to-Heat-Anlagen abzuschließen. Die Kosten dafür übernehmen die Übertragungsnetzbetreiber und rechnen sie über die Netzentgelte ab. Für die beiden Anlagen in Parchim und Hamburg lagen sie bei 2,3 Millionen Euro.

Eine dritte Anlage nahm im Dezember 2021 in Stralsund ihren Betrieb auf. Mit einer Leistung von 6,5 MW ist sie die bislang größte und ergänzt die Blockheizkraftwerke und vier Wärmespeicher. Drei weitere Projekte dieser Art sind in Planung.

Quellen und weitere Informationen:

- https://buerger-begehren-klimaschutz.de/wp-content/uploads/2021/10/Potenzialstudie_Berlin.pdf, S. 23
- https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2022/2022-10_DE_JAW2022/A-EW_283_JAW2022_WEB.pdf, S. 58
- https://www.umweltbundesamt.de/themen/erstes-halbjahr-2022-deutlich-mehr-strom-aus-wind
- https://www.energiewendebauen.de/projekt/sektorkopplung-ueberschuss-strom-unterstuetzt-waermeversorgung
- https://www.50hertz.com/News/Details/11600/nutzen-statt-abregeln-erste-power-to-heat-anlagen-in-mecklenburg-vorpommern-und-hamburg-gehen-in-betrieb,
- https://www.erneuerbareenergien.de/transformation/netze/nutzen-statt-abregeln-power-heat-anlagen-gehen-betrieb
- https://www.50hertz.com/de/News/Details/11606/weiterer-baustein-fuer-mehr-klimaschutz-50hertz-und-stadtwerke-stralsund-starten-power-to-heat-anlage

BÜRGER BEGEHREN KLIMASCHUTZ

WÄRME.WISSEN.KOMPAKT.

Wärmespeicher

BÜRGER
BEGEHREN
KLIMASCHUTZ

Wärmespeicher

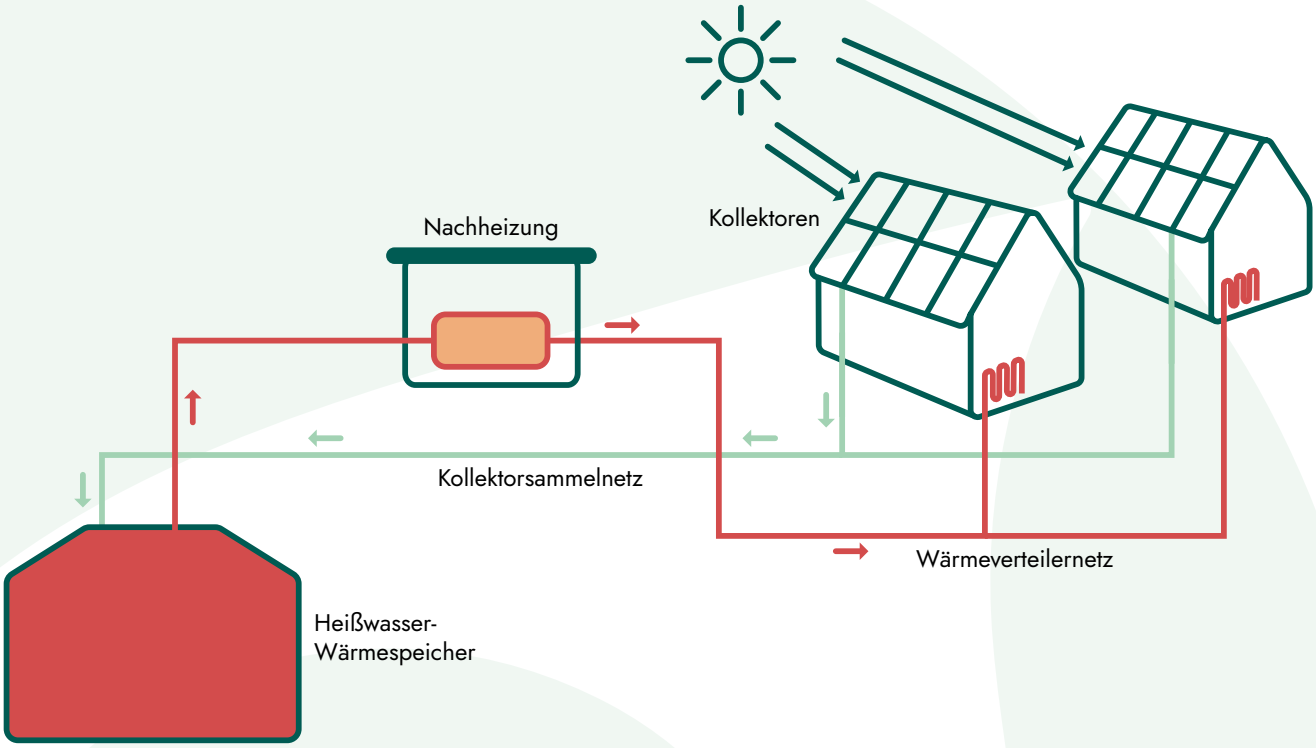
Der Wärmebedarf unterliegt sowohl im Tagesverlauf als auch im Jahresverlauf starken Schwankungen. Tagsüber wird mehr Wärme benötigt als nachts, im Winter mehr als im Sommer. Ebenso wie erneuerbarer Strom steht auch erneuerbare Wärme nicht konstant zur Verfügung. Temperaturen von Luft und Wasser sind im Winter geringer, die Wärme beispielsweise von Solaranlagen schwankt zusätzlich im Tagesverlauf. Während fossil erzeugte Wärme sich nach dem Bedarf richten kann, sind bei erneuerbarer Wärme Speicher notwendig, damit die Wärme immer dann zur Verfügung steht, wenn sie gebraucht wird. Grundsätzlich lässt sich zwischen kleineren Speichern, sogenannten Tagesspeichern, und großen saisonalen Speichern unterscheiden. Letztere können die Wärme über mehrere Wochen und sogar Monate speichern und können beispielsweise im Sommer erzeugte Wärme im Winter zur Verfügung stellen.

Insgesamt gibt es verschiedene Speichertechnologien, die auf unterschiedliche Wärmeanforderungen reagieren. Hierbei wird grundsätzlich ein Medium mit hoher Speicherkapazität, wie beispielsweise Wasser, erwärmt und durch eine entsprechende Isolierung von der Umwelt abgetrennt. Die thermischen Verluste sowie der Platzbedarf der Speicher stellen dabei limitierende Faktoren dar. In Fernwärmesystemen erfolgt die Wärmespeicherung konventionell über zylindrische, oberirdische Wassertanks. Für ein größeres Speichervolumen bieten sich sogenannte Erdbecken-Wärmespeicher an. Hier wird eine Grube ausgehoben, gegen die Umwelt abgedichtet und mit Wasser befüllt, das dann als Speichermedium fungiert. Aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität von Wasser wird hier eine hohe Effizienz der Speicherung erreicht. Gleichzeitig ist Wasser ein vergleichsweise günstiges und risikoarmes Speichermedium.

Die Dimensionierung eines Speichers ist abhängig vom lokalen Wärmekonzept und den eingebundenen Wärmequellen. Für Berlin beispielsweise ermittelte die von Fraunhofer IEE erstellte Potenzialstudie eine als Puffer benötige Speicherkapazität von 200.000 MWh. Dies entspricht einem Wasservolumen von mehr als 3,4 Mio. m^3. Hinzu kommen im Beispiel Berlin noch weitere 12 Mio. m^3 Wasser mit einer Speicherkapazität von 700 GWh zur saisonalen Speicherung der Solarthermie. Die Dimensionierung und die Standorte der Speicher sind abhängig von den systemischen und räumlichen Randbedingungen, jedoch sind große Speicher aufgrund geringerer spezifischer Wärmeverluste effizienter. Neben der Größe ist vor allem das Seitenverhältnis des Speichers entscheidend, gerade bei Erdbeckenspeichern muss es sich jedoch häufig den geologischen Gegebenheiten anpassen.

Speicher sind in räumlicher Nähe entweder von großen Wärmeerzeugern oder von großen Wärmeabnehmern am sinnvollsten. Synergieeffekte lassen sich erzielen, wenn verschiedene (Ab-)Wärmequellen und Speicher zu einem Energiepark zusammengefasst werden, da dann die Kosten für etwaige Anschlussleitungen gesenkt werden können.

Um einen Wärmespeicher zu bauen und nutzbar zu machen, ist zunächst der Speicherbedarf zu ermitteln. Aufgrund der Größe der saisonalen Wärmespeicher müssen für deren Errichtung dann entsprechende Flächen identifiziert und ausgewiesen werden. Die Eignung eines Speicher-Standorts ist dabei abhängig von den baulichen und genehmigungsrechtlichen Anforderungen sowie einer systemdienlichen Funktion. Durch die räumliche Zusammenlegung von Speichern und größeren Erzeugungsanlagen lassen sich Synergieeffekte schaffen und Speicher optimal positionieren.



Praxisbeispiele Berlin, Nechlin und Meldorf

Deutschlands größter Wärmespeicher entsteht momentan in Berlin. Um die 56.000 m³ Wasser aufzunehmen, wird ein Turm von 45 Meter Höhe und 43 Meter Durchmesser errichtet. Ein erster wichtiger Schritt, doch der Bedarf ist in Berlin noch sehr viel größer. Mit einer Leistung von 200 Megawatt kann der Speicher 13 Stunden lang Wärme abgeben, nicht genug, um über den Winter zu kommen. Dennoch ist ein Bauprojekt dieser Größe eine Herausforderung, allein das Befüllen des Speichers mit speziell aufbereitetem Wasser wird über zwei Monate in Anspruch nehmen. Die Inbetriebnahme ist für das zweite Quartal 2023 geplant.

Einen innovativen Ansatz, wenn auch in deutlich kleineren Dimensionen, verfolgt der Nechliner Windwärmespeicher. Seit 2020 ist in Nechlin ein Wärmespeicher in Betrieb, der bis zu 1000 m^3 Wasser fasst. Damit ist er deutlich kleiner als der Speicher in Berlin, der Durchmesser liegt bei 18 Metern. 17 Windkraftanlagen befinden sich in der Nähe von Nechlin. An besonders windigen Tagen kann das Netz die Strommenge nicht vollständig aufnehmen. Statt den Strom abzuregeln, wird er nun genutzt, um das Wasser im Speicher auf knapp 100 °C zu erwärmen. Er wird also ausschließlich mit Überschussstrom betrieben. Die Speicherkapazität beträgt 38.000 kWh, damit kann er die angeschlossenen 35 Haushalte (Anschlussquote in Nechlin: 90 %) bis zu zwei Wochen lang mit Wärme versorgen. Da alle ein bis zwei Wochen mehr Strom erzeugt wird, als ins Netz eingespeist werden kann, kann sich Nechlin über den Speicher vollständig mit Wärme aus Wind versorgen.

Unterstützt durch ein dänisches Beratungsunternehmen entsteht in dem 7.000 Einwohner*innen-Ort Meldorf gerade der erste Erdbeckenwärmespeicher Deutschlands nach dänischem Vorbild. Er soll 50 Gebäude mit klimafreundlicher Fernwärme versorgen. Ein Wärmenetz wird eigens dafür neu gebaut. Geheizt wird das Wasser im Speicher mit der Abwärme einer Druckerei, einem Biogas-Blockheizkraftwerk und zukünftig auch von einer Solarthermieanlage. Geplant ist der Wärmespeicher in Meldorf als Saisonalspeicher, 45.000 m^3 Wasser sollen es ermöglichen, die Wärme aus dem Sommer im Winter zur Verfügung zu stellen. Um die benötigte Fläche bereit zu stellen, wurde eine landwirtschaftlich genutzte Fläche entsprechend umgewidmet und der Speicher in der Nähe der Abwärmequellen platziert. Dichtungsplanen verhindern, dass die Wärme in den Boden entweicht, nach oben sorgt ein sogenanntes „Floating Cover" dafür, dass die Wärme im Speicher bleibt und der Beckeninhalt vor Umwelteinflüssen geschützt ist.

Quellen und weitere Informationen:

- https://buerger-begehren-klimaschutz.de/wp-content/uploads/2021/10/Potenzialstudie_Berlin.pdf, S. 17, S. 25f., S. 41
- https://www.klimafonds.gv.at/wp-content/uploads/sites/16/BGR0022015SE.pdf
- https://wärme.vattenfall.de/energie-news/deutschlands-groe%C3%9Fter-waermespeicher/#:~:text=45%20Meter%20hoch%2C%2043%20Meter,dem%20Volumen%20von%20350.000%20Badewannen
- https://www.klimareporter.de/technik/deutschlands-groesster-waermespeicher
- https://enertrag.org/wp-content/uploads/2020/02/Tafeln-am-Windw%C3%A4rmespeicher-Nechlin.pdf
- https://www.solarserver.de/2020/03/09/windwaermespeicher-windstromueberschuesse-liefern-waerme/
- https://enertrag.com/produkte/windwaerme
- https://www.stadt-und-werk.de/meldung_37921_Grube+als+W%C3%A4rmespeicher.html
- https://de.ramboll.com/projects/germany/meldorf
- https://www.ndr.de/nachrichten/info/Der-erste-Erdbeckenspeicher-Deutschlands-wird-in-SH-gebaut,erdbeckenspeicher100.html

BÜRGER BEGEHREN KLIMASCHUTZ

WÄRME.WISSEN.KOMPAKT.

Wasserstoff

BÜRGER
BEGEHREN
KLIMASCHUTZ

Wasserstoff

Wasserstoff ist ein Gas, dessen Vorteil darin besteht, dass es sich effizient speichern und damit flexibel einsetzen lässt. Wasserstoff lässt sich auf sehr unterschiedliche Art und Weise erzeugen. Dies wird häufig mit verschiedenen Farben beschrieben. Nachhaltig ist nur der grüne Wasserstoff, also Wasserstoff, der mit erneuerbarem Strom mittels Elektrolyse erzeugt wird. Dafür wird eine elektrische Spannung an ein Wasserbad angelegt, wodurch sich das Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff spaltet (Power-to-Gas). Besonders systemdienlich ist die Erzeugung von Wasserstoff dann, wenn dafür erneuerbarer Strom genutzt wird, der nicht ins Stromnetz eingespeist werden kann (Überschussstrom).

Farbiger Wasserstoff?

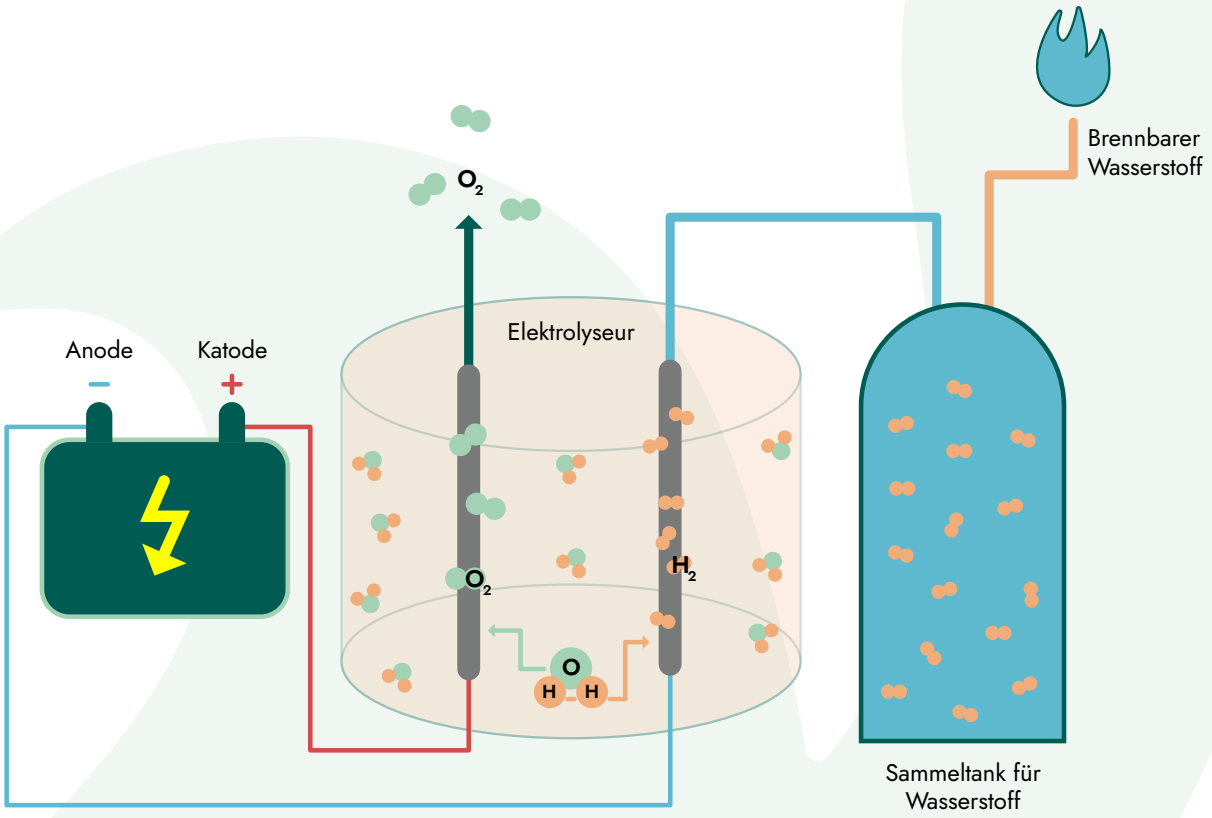
Wasserstoff ist ein farbloses Gas. Trotzdem werden, je nach Erzeugungsart des Wasserstoffs, verschiedene Farben unterschieden. Wirklich erneuerbar und damit klimaneutral ist nur grüner Wasserstoff.

- Grüner Wasserstoff: hergestellt mittels Elektrolyse unter Einsatz von erneuerbarem Strom.
- Roter Wasserstoff: hergestellt mittels Elektrolyse unter Einsatz von Atomstrom.
- Grauer Wasserstoff: hergestellt mittels Dampfreformierung auf Basis von fossilem Erdgas.
- Blauer Wasserstoff: hierbei handelt es sich um grauen Wasserstoff, wobei das freiwerdende CO2 abgeschieden und gespeichert wird (CCS).
- Türkiser Wasserstoff: hergestellt durch die thermische Spaltung von Methan (Methanpyrolyse). Das freiwerdende CO2 fällt als fester Kohlenstoff an.

Für die Wärmeerzeugung wird grüner Wasserstoff nur sehr begrenzt zum Einsatz kommen. Auf absehbare Zeit wird er knapp und damit teuer sein und deshalb vor allem in den Bereichen eingesetzt werden müssen, in denen keine direktelektrische Alternative zur Verfügung steht. Diese ist aufgrund der bei der Wasserstoffherstellung auftretenden Umwandlungsverluste deutlich effizienter. Ein Gutachten der Bundesregierung geht davon aus, dass Heizen mit Wasserstoff im Vergleich zur Wärmebereitstellung durch eine Wärmepumpe durchschnittlich der 6-10-fachen Strombedarf zugrunde liegt. Der hohe Strombedarf ist auch der Grund, warum laut Gutachten die Nutzung von Wasserstoff im Gebäudebestand bis 2030 vollständig ausgeschlossen und anschließend nur in sehr geringen Mengen für möglich gehalten wird, wenn der Gebäudesektor bis 2045 klimaneutral werden soll.

Wasserstoff sollte im Rahmen eines Wärmekonzepts also nur zur Deckung der Spitzenlast im Wärmenetz zum Einsatz kommen, wenn ein speicherbarer Energieträger benötigt wird und keine effizientere Wärmeerzeugungsmöglichkeit zur Verfügung steht. Wasserstoff wird also erst dann genutzt, wenn alle anderen Wärmepotenziale vollständig ausgeschöpft sind. Zu beachten ist dabei, dass der Einsatz von Wasserstoff eine ausreichende Verfügbarkeit sowie die Möglichkeit zur Speicherung des Wasserstoffs voraussetzt – beides ist bislang nicht gegeben.

Die Nutzung von Wasserstoff zur Spitzenlast-Abdeckung erfordert den Bau oder die Umrüstung von Gas-Leitungen und -Speichern sowie Heizwerken. Für die richtige Dimensionierung ist ein Gesamtkonzept zu erstellen und die Konkurrenz zu energieeffizienteren (und damit oft auch kostengünstigeren) Versorgungsoptionen zu berücksichtigen.



Praxisbeispiel Esslingen

Aus den oben beschriebenen Nachteilen spielt die direkte Nutzung von Wasserstoff bei der Wärmewende bislang keine zentrale Rolle. Bei einem weiteren Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft sollten allerdings die Erzeugungsanlagen von Wasserstoff in den Blick genommen werden. Genau das passiert bei einem Neubauquartier in Esslingen. Auf 120.000 Quadratmetern entstehen 450 Wohnungen, Büro- und Gewerbeflächen sowie ein Neubau der Hochschule Esslingen, dessen Wärmebedarf nun zumindest teilweise durch den Elektrolyseur gedeckt wird. In Esslingen erzeugt ein unterirdischer Elektrolyseur bis zu 400 Kilogramm Wasserstoff am Tag, also etwa 80 Tonnen im Jahr. Rund 30 % des eingesetzten grünen Stroms fallen als Abwärme mit etwa 65 °C an. Diese Wärme wird in das Nahwärmenetz eingespeist. Der Nutzungsgrad des Elektrolyseurs erhöht sich durch die Wärmeauskopplung von 60-65 % auf etwa 80-85 %. 2021 hat der Testbetrieb des mit zwölf Millionen Euro vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Forschungsprojekts begonnen.

Quellen und weitere Informationen:

- https://buerger-begehren-klimaschutz.de/wp-content/uploads/2021/10/Potenzialstudie_Berlin.pdf, S. 25f., S. 41
- https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/wissenswertes
- https://stiftung-umweltenergierecht.de/e-letter/e-letter-juni-2021/wasserstoff/
- https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Klimaschutz/gebaeudestrategie-klimaneutralitaet-2045.pdf?__blob=publicationFile&v=6, S. 30
- https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Klimaschutz/gebaeudestrategie-klimaneutralitaet-2045.pdf?__blob=publicationFile&v=6, S. 29f.
- https://www.dabonline.de/2022/09/30/gruener-wasserstoff-elektrolyse-klimaneutrales-quartier-photovoltaik-esslingen/
- https://www.stadt-und-werk.de/meldung_40629_Elektrolyseur+spendet+Abw%C3%A4rme.html
- https://green-hydrogen-esslingen.de/
- https://www.kea-bw.de/kea-map/lightbox-1-1-3-1-1-1

BÜRGER
BEGEHREN
KLIMASCHUTZ