

Anergienetz zum Heizen und Kühlen

Ein Anergienetz kann im Sinne einer dezentralen thermischen Vernetzung gleichzeitig die Wärme- wie auch die Kälteversorgung für ein geeignetes Versorgungsgebiet sicherstellen. In einem modernen Gebäudepark eines Spitalareals kann eine solche Lösung ökologisch und ökonomisch sinnvoll sein, wie das Beispiel des Universitätsspitals Zürich zeigt.

Text, Bilder und Grafiken
Timotheus Zehnder, Gregor Jeker

Im Verlaufe der Jahre 2019 bis 2047 wird der Gebäudepark des Universitätsspitals Zürich (USZ) sukzessive erneuert oder saniert. In diesem Artikel werden der Aufbau und die Charakteristik eines möglichen Anergienetzes als Energieversorgungskonzept für das gesamterneuerte USZ-Areal untersucht. Dabei wird eine thermische Vernetzung, mit maximaler Synergienutzung zwischen den Kälte- und Wärmeverbrauchern und über die Jahreszeiten, angestrebt. Da der Kältebedarf in einem Spitalareal in Zukunft wohl klar dominiert, wird dabei ein Temperaturniveau anvisiert, das einen hohen «Free cooling»-Anteil ermöglicht (Free cooling = Freie Kühlung, resp. Direktkühlung vom Netz).

Grundsätzliche Voraussetzungen

Ein Anergienetz zur thermischen Energieversorgung kann eine sinnvolle Lösung sein, wenn:

- Wärme- und Kältebezüger vorhanden sind und diese geografisch nahe beieinander liegen;
- hohe Bandlasten vorhanden sind, oft mit gleichzeitigem Wärme- und Kältebezug;
- die Energiebilanz signifikanten Wärme- und Kältebedarf aufweist und idealerweise übers Jahr einigermaßen ausgeglichen ist;
- eine saisonale Speicherung realisierbar ist (z. B. mit Erdsonden) oder eine ganzjährige Quelle oder Senke (je nach Bedarf) nahe der Netztemperatur vorhanden ist;
- optimale Bedingungen vorliegen, um

im Versorgungsperimeter Rohre mit grossem Durchmesser zu realisieren, wobei die Umgebungstemperatur nahe bei der mittleren Netztemperatur liegt (Wegfallen von teurer Dämmung);

◦ die Systemtemperaturen der Bezüger so nahe wie möglich an der Netztemperatur liegen (d. h. bei Neubauten oder sanierten Bestandesbauten).

Das gesamterneuerte USZ-Areal erfüllt mehrheitlich diese Voraussetzungen und eignet sich somit grundsätzlich für ein Anergienetz.

Energie- und Leistungsanalyse

Die vorgeschlagene Form der thermischen Vernetzung ist für Spitäler wie das USZ-Areal zweckmässig, da es trotz starker saisonaler Schwankungen sowohl beträchtliche Wärme- wie auch Kältebandlasten aufweist (siehe Bild 1, der Wärmebedarf ist positiv dargestellt, der Kältebedarf negativ, die graue Schraffur zeigt den monatlichen Residualbedarf). Die Energie- und Leistungsanalyse ergibt beispielsweise für das Fertigstellungsjahr 2047 einen etwa doppelt so hohen Kälte- wie Wärmebedarf. Somit stellt sich die Frage, wie mit der überschüssigen Wärme umgegangen wird (siehe Kapitel Erdspeichergrösse).

Netzcharakteristik

Eine mögliche Form eines Anergienetzes für das USZ-Areal ist in Bild 2 dargestellt: ein sogenannt ungerichtetes 2-Leiter-System, das ohne eine durch die Hauptpumpe vorgegebene Fliessrichtung funktioniert (siehe Infobox Anergienetz auf den Folgeseiten). Dies ermöglicht den mit dezentralen Wärmepumpen und Kältemaschi-

nen ausgestatteten Netzteilnehmern den Bezug aus dem sogenannten Warm- oder Kaltleiter. Der Energiefluss erfolgt dabei bidirektional, das heisst, Bezüger können aus Sicht des Netzes sowohl als Quelle oder Senke funktionieren und sich teilweise gegenseitig versorgen. Die vorgeschlagene Netztemperatur variiert je nach Jahreszeit zwischen 3 und 19 Grad Celsius und wird durch zwei Erdspeicherfelder

Zu diesem Artikel

Der vorliegende Artikel basiert auf einer Diplomarbeit, die mit dem SWKI-Ausbildungspreis 2018 ausgezeichnet worden ist. Weitere Informationen: www.swki.ch.

Autoren:

Timotheus Zehnder, Msc in Business & Economics, BSc in Gebäudetechnik HLKS
Gregor Jeker, Haustechnikplaner Fachrichtung Heizung EFZ, BSc in Gebäudetechnik HLKS

Dozierende:

Hochschule Luzern, Institut für Gebäudetechnik und Energie IGE
Prof. Dr. Zoran Alimovic, PhD, MBA, dipl. HLK-Ing. FH
Stefan Mennel, BSc in Gebäudetechnik HLKS

Bauherren-Vertreter:

Gerhard Treiber, dipl. Ing. FH, Projektleiter Universitätsspital Zürich (USZ).

Die Arbeit wurde mit Unterstützung des Büros Jobst Willers Engineering AG Rheinfelden durchgeführt.

Jahreslastprofil 2050 – USZ-Areal

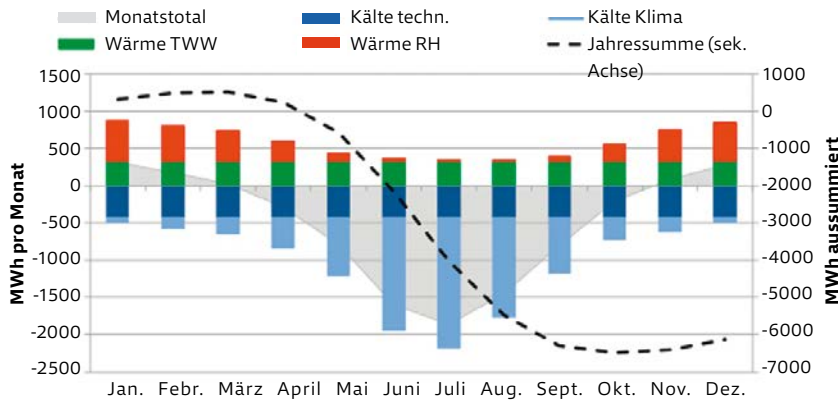


Bild 1: Jahreslastprofil im Jahre 2050 für das USZ-Areal nach erfolgter Kompletterneuerung.

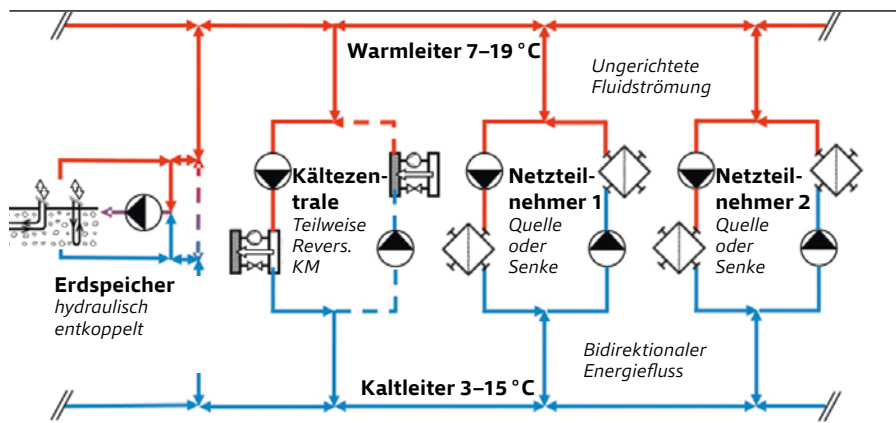


Bild 2: Schematische Darstellung der untersuchten Anergienetz-Lösung für das USZ-Areal (eigene Darstellung).

und zwei Kältezentralen bewirtschaftet, ausgestattet mit verschiedenen grossen Kompressions-Kältemaschinen. Je nach Grösse der Erdspeicherfelder kann dabei durch eine durchdachte Betriebsstrategie die Kälte bei tiefen Aussentemperaturen effizienter erzeugt und somit Energie und Kosten gespart werden.

Temperaturen

Entscheidend für die Funktionsweise, die Dimensionierung und den Energiebedarf des vorgeschlagenen Anergienetzes sind die Grössen: Systemtemperaturen Bezüger, Temperaturniveau, Temperaturspreizung und Erdspeicherkapazität. Diese hängen eng zusammen und sollten nie isoliert betrachtet werden.

◁ Systemtemperatur Bezüger: Grundsätzlich sollten die Vorlauftemperaturen für Heizzwecke möglichst tief und die Vorlauftemperaturen für Kühlzwecke möglichst hoch gewählt werden. Bei genügender Temperaturspreizung über die Verbraucher ist dadurch wenig (durch Wär-

mepumpe oder Kältemaschine) bis gar keine (Direktnutzung) zusätzliche Aufbereitung notwendig, um die erforderlichen Systemtemperaturen der Bezüger zu erreichen.

◁ Temperaturniveau: Wenn ein Erdspeicher für den Ausgleich saisonaler Schwankungen verwendet wird, sind Netztemperaturen im Bereich der mittleren Erdtemperatur zu verwenden, um Verluste im Erdreich zu minimieren. Um das System mit Wasser betreiben zu können und die Einfriergefahr von den Verdampfern zu minimieren, wird als Untergrenze eine Temperatur von 2 bis 4 Grad Celsius empfohlen. Die Obergrenze wird so gewählt, dass ein möglichst grosser Anteil des Kältebedarfs direkt vom Kaltleiter, d. h. ohne dezentrale Kältemaschine, bezogen werden kann.

◁ Temperaturspreizung: Sind Netztemperaturengrenzen definiert, so hängt die Speicherkapazität, und somit die Grösse des notwendigen Erdspeichers, von der Temperaturspreizung zwischen Warm- und Kaltleiter ab. Für das Netz gilt: Je grösser die Temperaturspreizung, desto kleiner ist der Massenstrom für die Übertragung der Wärme- oder Kälteleistung. Daraus resultieren kleinere Dimensionen und ein tieferer Pumpenstrom.

◁ Erdspeicherkapazität: Für den Erdspeicher gilt: Je grösser die Differenz zwischen der minimalen Austrittstemperatur für Heizzwecke und der maximalen Austrittstemperatur für Kühlzwecke, desto grösser ist die Kapazität pro Sondenmeter. Wo das Optimum liegt, muss von Fall zu Fall ökologisch und energetisch untersucht werden. Die gewählten vier Kelvin im Falle der untersuchten Netzvariante stellen lediglich eine Möglichkeit dar und können mittels STANET (siehe weiter unten) weiter untersucht werden.

Aufgrund der dargelegten Zusammenhänge bergen die Systemtemperaturen der

The advertisement shows a family of three: an elderly woman (Grossmutter Inés), a man (Vater Teófilo), and a young boy (Sohn Ribartha, 6 years old). They are smiling and holding a glass of water. The text reads: 'Ich trank Flusswasser.' (Grandmother Inés), 'Ich trank Quellwasser.' (Father Teófilo), and 'Ich trinke Leitungswasser.' (Sohn Ribartha, 6, Bolivien). The Helvetas logo is present, along with the text: 'Unterstützt durch GEBERIT' and 'Verantwortung übernehmen, Wasserversorgung sichern, Perspektiven schaffen. So verändern Menschen mit der Unterstützung von Helvetas ihr Leben. Helfen Sie mit: helvetas.org'. The Helvetas logo is also shown at the bottom right with the tagline 'Partner für echte Veränderung'.

Bezüger ein grosses Optimierungspotenzial für die Dimensionierung und den Energiebedarf des ganzen Anergienetzes. Besonders bei Kältebezügern sollte deshalb auf moderne Geräte und Systeme mit hohen Vorlauftemperaturen gesetzt werden, mit maximalem «Free cooling»-Anteil.

Erdspeichergrosse

Für das vorgeschlagene Anergienetz werden Erdsonden als Speichervariante untersucht. Zur Bestimmung der Grösse dieser Erdsondenfelder gibt es grundsätzlich zwei Varianten:

◁ Variante Heizen (klein): Die Erdsonden werden so ausgelegt, dass sie im Winter als Wärmequelle ausreichend Leistung und Energie zur Verfügung stellen. Somit wird das Erdreich in der Heizperiode heruntergekühlt. Damit können Verbraucher im Sommer teilweise gekühlt werden. Der Rest wird durch Rückkühler vernichtet.

◁ Variante Kühlen (gross): Die Erdsonden werden so ausgelegt, dass im Sommer ein Grossteil der Kälteleistung und -energie abgedeckt werden kann. Im Winter wird die überschüssige Wärme an umliegende Verbraucher oder effizient die an Aussenluft (via Rückkühler) abgegeben.

Die Vor- und Nachteile der beiden Varianten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Um einen Entscheid bezüglich Speichergrosse zu fällen, müssen Kostenanalysen, eine Simulation der Sonden sowie Abklärungen bezüglich potenzieller Wärmeabnehmer und Absatzpreise durchgeführt werden. Grundsätzlich wird in Fall des USZ empfohlen, mit der Variante Heizen zu beginnen, aber zusätzliche Reserven für den Endausbau vorzusehen.

Untersuchte Anergienetz-Lösung

In Bild 3 ist eine Netzvariante für das untersuchte USZ-Areal dargelegt. Mittels der erläuterten Netzcharakteristik und der saisonalen Speicherung (EWS 1 & 2) kann die entstehende Abwärme im Sommer den Wärmebedarf über das Jahr komplett decken. Somit braucht es keine zusätzliche zentrale Quelle (die Abwärme des Sommers ist die einzige Wärmequelle). Bei der dezentralen Wärmeaufbereitung wird dabei ein hoher Wirkungsgrad angestrebt, indem nach Systemtemperaturen der Verbraucher unterschieden wird und diese möglichst tief gehalten werden.

Die Kälteaufbereitung kann mehrheitlich zentral durch Turboverdichter-Kältemaschinen mit hohem Wirkungsgrad erfolgen (KäZn 1 & 2). Die Abwärme dieser Kältezentralen wird in einem hydraulisch

getrennten Rückkühlnetz entweder an angrenzende Gebiete abgegeben oder über Hybrid-Rückkühler an die Umwelt abgeführt. Innerhalb des Anergienetzes wird ein grösstmöglicher «Free cooling»-Anteil angestrebt. Aufgrund der tiefen maximalen Kaltleitertemperatur von 15 Grad Celsius benötigt lediglich der Entfeuchtungsbetrieb den Einsatz der dezentralen Kältemaschinen, deren höherwertige Ab-

wärme direkt für die Warmwasseraufbereitung verwendet wird.

Topologie-Untersuchungen

Durch die wahlweise Realisierung der Abschnitte 11 und 12 (siehe Bild 3) können verschiedene Topologie-Varianten geprüft werden. Mittels dem Netzberechnungs- und Simulationstool STANET wird ein energetischer und ökonomischer Vergleich

	Variante Heizen	Variante Kühlen
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - Tiefe Investitionskosten - Klare und einfache Bewirtschaftungsstrategie der Sonden - Ausbau jederzeit möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Tiefe Betriebskosten, aufgrund besserer Arbeitszahlen der Wärmepumpe im Winter - Überschüssige Abwärme kann im Winterhalbjahr einfacher verkauft werden - Geringere Leistung der Kältemaschinen
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - Betrieb Rückkühler und Kältemaschinen im Sommerhalbjahr => Tiefere ESEER und höhere Betriebskosten - Abwärme im Sommer muss höchstwahrscheinlich vernichtet werden - Grössere Leistung der zentralen Kältemaschinen im Sommer 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Investitionskosten - Bewirtschaftung der Sonden erfordert Erfahrung und gute Planung - Viele Sondenfelder in einem thermischen Netz sind eine grosse Herausforderung

Tabelle 1: Vor- und Nachteile verschiedener Erdspeichergrossen.

Ergebnisse Topologie-Untersuchung	Baumstruktur (11 & 12 nicht realisiert)			Einfache Ringstruktur (11 realisiert, 12 nicht)			Maschenstruktur (2 Ringe) (11 & 12 realisiert)			
	Sommer	Winter	Frühling	Sommer	Winter	Frühling	Sommer	Winter	Frühling	
Lastfall										
Thermische Energie	94	73	51	94	73	51	94	73	51	[MWh/a]
Elektrische Förderenergie (exkl. Sondenpumpe)	2215	1613	1079	2184	1603	1073	2182	1592	1072	[kWh/a]
Verhältnis elektrisch/thermisch	2.35	2.21	2.09	2.32	2.19	2.08	2.32	2.18	2.08	[%]
Jährliche Energieeinsparung						-4700			-6024	[kWh/a]
Jährliche Kosteneinsparung (0,15 CHF/kWh)						-705			-904	[CHF/a]
Mehrinvestition (1500 CHF/Trassemeter)						105000			262500	[CHF]
Amortisationsdauer (0% Zins)						149			291	[Jahre]

Tabelle 2: Ergebnisse der Topologie-Untersuchung der Anergienetz-Variante.

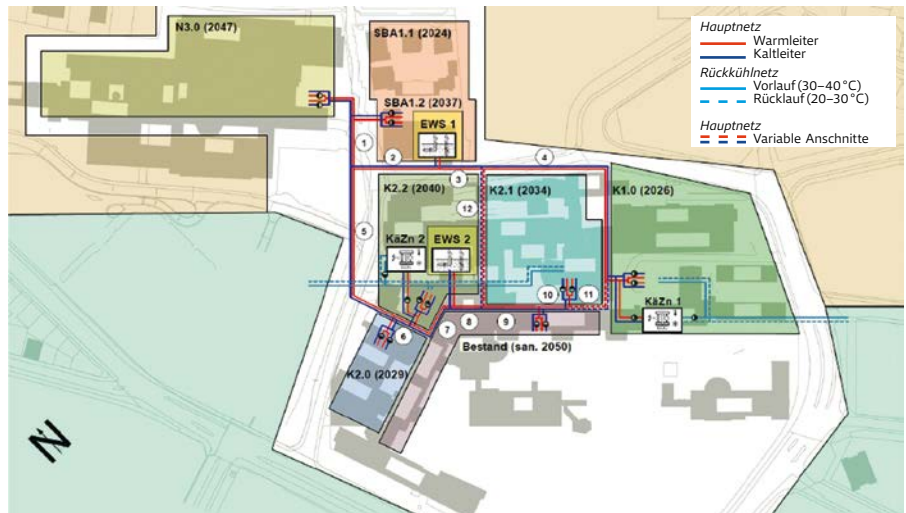


Bild 3: Topologische Darstellung der untersuchten Anergienetz-Variante für das USZ-Areal mit möglicher Etappierung.

zwischen der Realisierung einer Baum-, Ring- oder Maschenstruktur durchgeführt, indem die Förderenergie verschiedener Lastfälle (Winter, Sommer, Frühling) simuliert wird. Durch die Abbildung und die Simulation in STANET (siehe Bild 4) konnte das Netz dimensioniert werden und die Versorgungssicherheit für die verschiedenen Lastfälle konnten untersucht und bestätigt werden. Die verschiedenen Netzvarianten (Baum-, Ring- oder Maschenstruktur) wurden mittels eines wahlweise geöffneten oder verschlossenen Schiebers in den Abschnitten 11 und 12 realisiert und analysiert (siehe Bild 5 und 6).

Wie der Tabelle 2 entnommen werden kann, ist in diesem Anwendungsfall eine Baumstruktur ökonomisch am sinnvollsten. Aus redundanztechnischen und energetischen Überlegungen wird aber trotzdem eine einfache Ringstruktur mit einzelner Verästelung empfohlen. Eine Maschenstruktur, realisiert durch einen zusätzlichen Ringschluss, bringt bezüglich benötigter Förderenergie kaum Vorteile, ist aber mit erheblichen Mehrinvestitionen verbunden. Anhand der Simulation kann zudem aufgezeigt werden, dass die Wahl der Topologie (Baum-, Ring- oder Maschenstruktur) keine Auswirkung auf die hydraulische Funktionalität des Netzes hat. Das heisst, eine Versorgung aller Bezüger ist mit allen untersuchten Netzstrukturen jederzeit gewährleistet. Eine Strukturänderung oder ein Netzausbau, zum Beispiel die Erschliessung der Universität oder ETH Zürich, ist somit möglich.

Energiefluss-Analyse

Die Energieflussanalyse der untersuchten Netzvariante (s. Bild 7) zeigt, dass dank des thermischen Netzes und des saisonalen Speichers etwa die Hälfte der genutz-

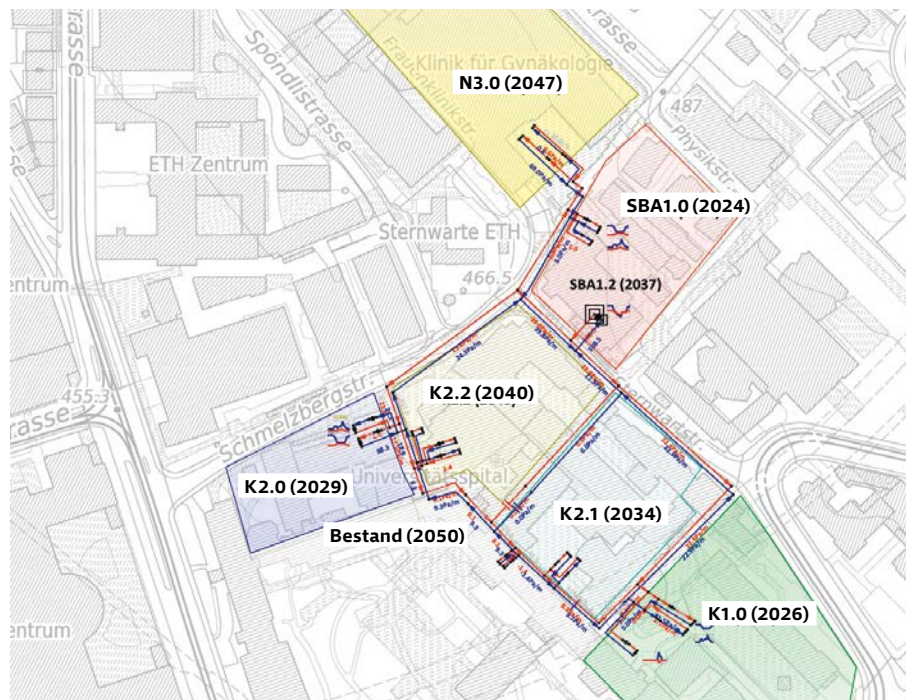


Bild 4: STANET-Modell der untersuchten Anergienetz-Variante.

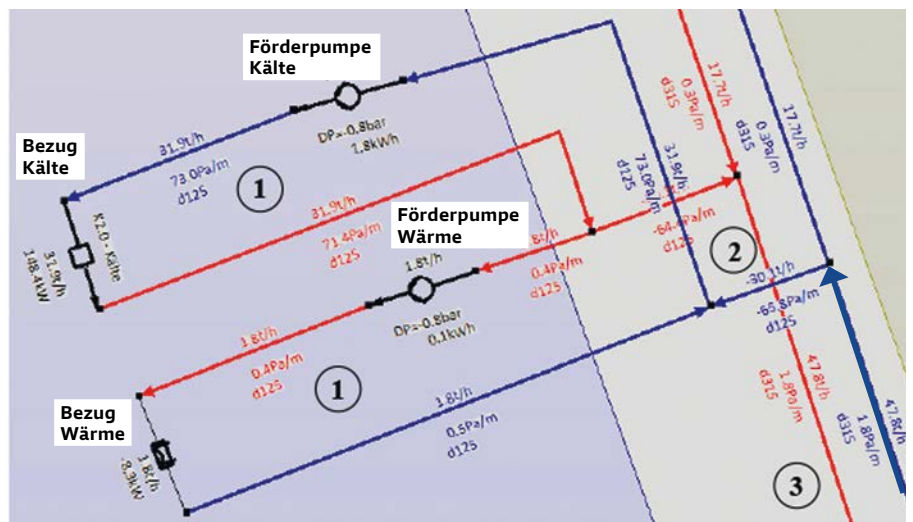


Bild 5: STANET-Ausschnitt eines Bezügers im Anergienetz (Sommerfall).

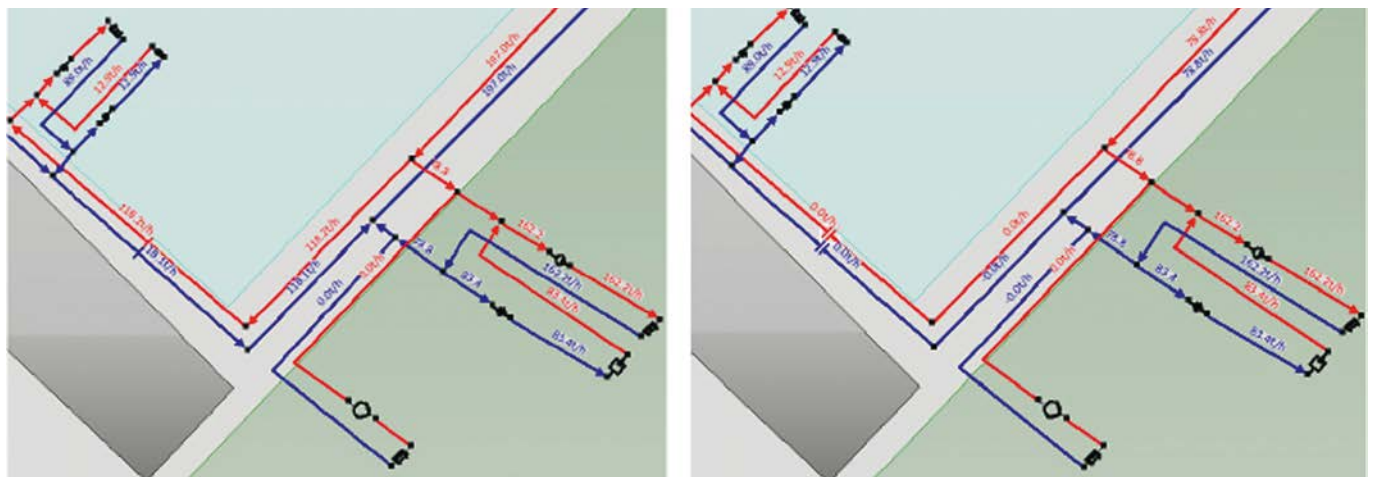


Bild 6: Flussrichtung und Massenströme mit (links) und ohne (rechts) den Abschnitt 11 (Winterfall) in STANET.

ten Energie innerhalb des Systems umgesetzt werden kann. Durch maximale Synergienutzung und kurzen Versorgungswegen kann ein ökologisches Gesamtbild gezeichnet werden. Bis zur Realisierung müssen aber noch Herausforderungen solcher Anergienetze gemeistert werden, wie zum Beispiel die durch die dezentralen Förderpumpen entstehenden Temperatur- und Druckschwankungen.

Fazit

Durch die jährlichen komplementären Wärme- bzw. Kältebelasten kann ein Anergienetz ein geeignetes Energieversorgungssystem für das USZ sein. Bidirektionaler Energiefluss und ungerichtete Fluidströmung sind die Hauptmerkmale. Mit einer geeigneten Netztopologie wird die Versorgungssicherheit garantiert und gleichzeitig Förderenergie eingespart.

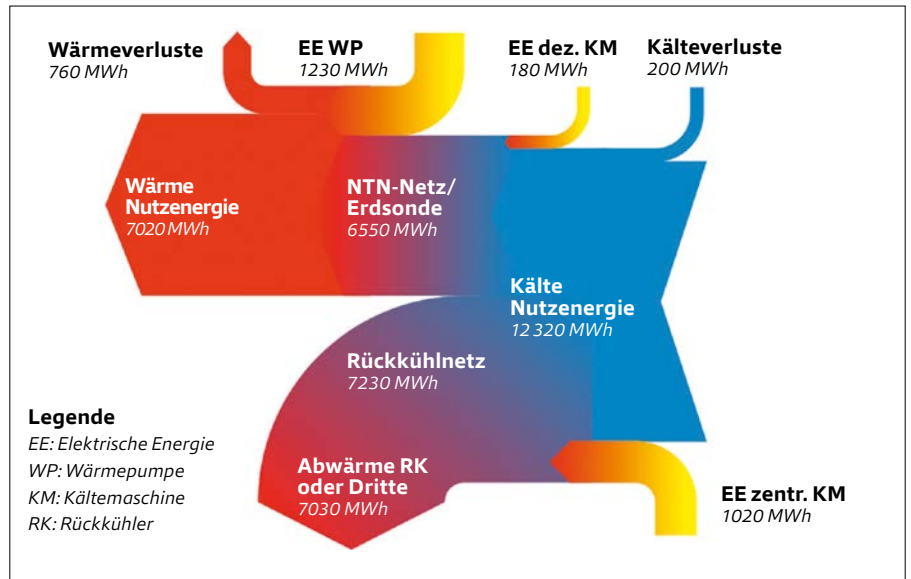


Bild 7: Energieflussdiagramm der untersuchten Anergienetz-Variante (eigene Darstellung).

Anergienetz

Thermische Niedertemperaturnetze sind Energieversorgungsnetze, die ein Temperaturintervall von 0 bis 60 Grad Celsius aufweisen und sowohl zum Heizen und Kühlen verwendet werden. In der Praxis wird oft der Begriff «Anergienetz» verwendet. Gegenüber unidirektionalen Netzen zum Heizen oder Kühlen fungieren bidirektionale Netze aus Sicht der Bezüger als Wärmequelle (Heizen) und als Wärmesenke (Kühlen). Um möglichst grosse thermische Synergien zwischen Wärme- und Kältebezügern zu

nutzen, sind komplementäre Tages- und Jahreslastprofile sowie eine einigermaßen ausgeglichene Jahresenergiebilanz unter allen Netzteilnehmern zielführend. Vollständig stellt sich diese jedoch kaum ein, deshalb müssen zusätzliche Wärme- bzw. Kältelieferanten ins Netz integriert werden. Zum Ausgleichen von jahreszeitlichen Lastschwankungen können saisonale Speicher verwendet werden. Damit die Bezüger die benötigte Residualenergie (Differenz zwischen momentanem Kälte- und Wärmebedarf) aus einem der beiden Leiter des Anergienetzes ziehen können, sind dezentrale Förderpumpen

notwendig. Durch die variierende Wärme- und Kälteanforderung im Netz entsteht ein ungerichteter Medienfluss. Im Gegensatz zum gerichteten Netz mit Hauptpumpe spricht man bei einem 2-Leitersystem nicht mehr von Vor- und Rücklauf, sondern von Warm- und Kaltleiter.

Bestehende Netze

Zwei bereits bestehende Netze sind auf dem ETH-Campus Hönggerberg und beim Suurstoffi-Areal in Rotkreuz in Betrieb. Durch das Monitoring während des laufenden Betriebs konnten wegweisende Erkenntnisse gewonnen werden, die für die zukünftige Planung von Anergienetzen verwendet werden können.

Herausforderungen

Aus Erkenntnissen von bestehenden Netzen und dem aktuellen Forschungsstand sind noch einige Herausforderungen für einen einwandfreien Betrieb von Anergienetzen zu bewältigen. Als Beispiel können durch die dezentralen Förderpumpen Druckschwankungen im Netz entstehen, die zu Unterversorgung von Bezügern führen können. Um diese Unterversorgung zu vermeiden, sind geeignete Druckverhältnisse im Netz anzustreben. Ebenso kann es im Netz zu Temperaturinseln kommen. Dabei schaukelt das Temperaturniveau in einem Netzabschnitt in eine Richtung, wenn kein ausreichender Medienfluss gewährleistet ist. Für einen ausreichenden Energiefluss bei den Bezügern kann es in diesem Fall zu massiv erhöhten Förderenergien der Pumpen kommen. Zu den erwähnten Herausforderungen werden laufend neue Forschungsergebnisse publiziert.

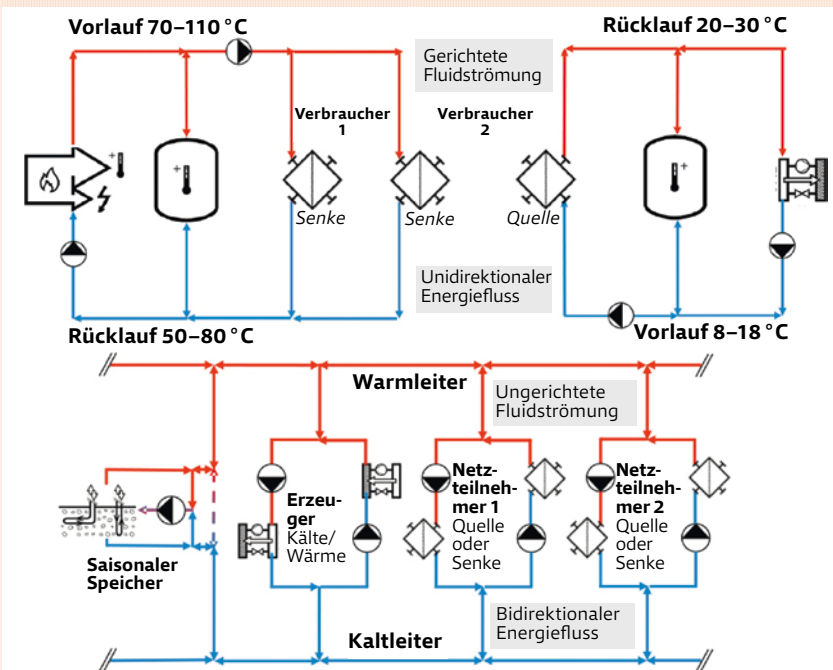


Bild 8: Vergleich zentrale Energieversorgung (oben) versus dezentrales Anergienetz (unten).