

Berthold Mengede

Erdgekoppelte Wärmepumpen – Wirtschaftlichkeit und Betriebserfahrungen

Die Energiekosten erhalten speziell im Bürobereich eine höhere Bedeutung. Trotzdem ist seit dem warmen Sommer im Jahr 2003 ein steigender Bedarf an Klimatisierung sichtbar. Eine fehlende Klimatisierung verringert den Mietpreis. Nur wenn eine Klimatisierung verfügbar ist, sind die Mieter bereit, eine höhere Miete zu zahlen. Dabei wird die Bauteilkühlung gegenüber den Lüftungssystemen bevorzugt.

Heat pumps with earth probes – economy and experiences

The costs caused by the energy consumption becomes more important in the field of office buildings. Especially due to the hot summer in 2003 an increasing need of cooling is visible. Without any air conditioning the price to rent a office is low. Only if air conditioning is available, the tenant will be willing to pay a higher price. Chilled ceilings becomes more interest as ventilation systems.

Keywords: heat pump; chilled ceiling; earth probe; control system; economics

Geothermie als Alternative zu konventionellen Systemen

Im Zuge der Energiepreisentwicklung in den zurückliegenden Jahren wird in verstärktem Maß die Nutzung von geothermischen Systemen in Betracht gezogen. Bei der Dimensionierung der Systeme als auch bei der Festlegung des regelungstechnischen Konzeptes ist besondere Sorgfalt geboten. Insbesondere hohe Speichermassen in Verbindung mit hohen Betriebszeiten unter Vollastbedingungen begünstigen hierbei die energetische Bilanz der Gesamtsysteme und damit deren Wirtschaftlichkeit. Hinsichtlich der Energiebilanz sollten dabei System im thermischen Pendelbetrieb ausgelegt werden. Ein wesentlicher Vorteil besteht in der über das gesamte Betriebsjahr ausgeglichenen Energiebilanz.

An einem ausgeführten Beispiel eines zehnstöckigen Bürogebäudes sollen die Rahmenbedingungen für eine monovalente Versorgung über eine geothermische Wärmepumpe zur Beheizung aufgezeigt werden.

Bei der Festlegung eines entsprechenden Gebäudekonzeptes sind neben den Lastermittlungen für Heiz- und Kühlfall gleichermaßen die geothermischen Rahmenbedingungen zu ermitteln. Im Regelfall sind über entsprechende Bodengutachten die Rahmenbedingungen für eine geothermische Anlage zu bestimmen. Im vorliegenden ausgeführten Fall ergab eine Voruntersuchung von bereits vorhandenen geologischen Daten über den Standort des Gebäudes zunächst, dass sich der Untergrund generell für eine geothermische Nutzung eignet. Eine Absicherung kann und sollte bei größeren Projekten über Probebohrung auf dem Baugelände mit abschließendem „Thermal Response Test“ erfolgen. Diese liefert die physikalischen

Daten zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes und des thermischen Bohrlochwiderstandes, welche als Basis in die Auslegung der Erdsondenanlage eingehen. Im vorliegenden Fall belegten die geologischen Ergebnisse, dass ein monovalenter Systemaufbau realisierbar war. Über die Steigerung der Anzahl der unter der Bodenplatte bis in eine Tiefe von 99 m reichenden Erdsonden von ursprünglich 12 auf 15 sowie durch Optimierungen an der Gebäudehülle (verbessertes U-Wert der Fenster, integrierter Sonnenschutz) konnte der Heiz- bzw. Kühlbedarf so weit reduziert werden, dass die Gebäudetemperierung monovalent über eine geothermische Wärmepumpe möglich wurde. Der ursprünglich eingeplante Spitzenlastkessel war damit überflüssig.

Als Erdsonden kamen Polyethylen Doppel-U-Rohrsonden mit einem Rohrdurchmesser von 40 mm zum Einsatz. Um einen optimalen wärmeleitenden Kontakt mit dem umgebenden Gebirge herzustellen, wurde das Bohrloch über ein zusätzliches eingeführtes Injektionsrohr mit einer Quarzmehlzementsuspension (Thermozement) verpresst. Als Wärmeträgerflüssigkeit dient ein Gemisch aus Wasser mit einem umweltverträglichen Frostschutzmittel. Jede Sonde ist einzeln an den Verteiler/Sammlerbalken angeschlossen.

Abgestimmtes Heiz-/Kühl-/Lüftungssystem

Das Heiz-, Kühl- und Lüftungssystem für die Büroräume wurde für eine möglichst flexible Raumnutzung ausgelegt. Außerdem sollte die Anlage dynamisch auf die für den Standort typischen Wetterveränderungen reagieren können. Hierbei war unter anderem der Einfluss der Medientemperaturen gem. Bild 1 zu berücksichtigen. Folgendes Konzept wurde umgesetzt:

Dr.-Ing. B. Mengede, Zent-Frenger, Ges. für Gebäudetechnik mbH, Niederlassung Hepenheim

- der Heiz- und Kühlbedarf der Büroräume wird zu rund 70 Prozent über die thermische Aktivierung der unverkleideten Betondecken erbracht. Dies bedeutet im Heizfall eine Grundtemperierung bis etwa 18°C Raumtemperatur
- das regulative Zusatzelement ist ein auf das Rastermaß des Gebäudes abgestimmtes Decken-Randstreifenelement (RSE) zur individuellen Anpassung der Raumtemperatur von Stand-by- bzw. Economy-Betrieb auf Komforttemperatur. Diese flink reagierenden, von der Betondecke abgehängten Heiz-/Kühldeckensegel aus perforiertem Stahlblech und integrierten, wasserdurchströmten Kupferrohrregister mit magnetbestückten Aluminium-Wärmeleitprofilen übernehmen neben der individuellen Regulierung der Raumtemperatur auch den Temperatenausgleich bei einer kurzfristigen Wetteränderung, z.B. bei Föhn oder höheren inneren Lasten. Die schallabsorbierende Eigenschaft der Randstreifenelemente war für die Verbesserung der Raumakustik wegen der unverkleideten Betondecken ein wichtiger zusätzlicher Aspekt. Aus Kostengründen wurden jeweils mehrere Randstreifenelemente entsprechend den Himmelsrichtungen zu einer Regelzone zusammengefasst. Der Raumtemperaturfühler befindet sich in einem festgelegten Referenzraum. Die Flexibilität der Raumaufteilung bleibt innerhalb des gewählten Gebäuderasters zu 100 % erhalten
- die Grundlüftung der Büros erfolgt über ein Zuluft-Abluftsystem mit hochwertiger Wärmerückgewinnung. Während die vertikalen Luftkanäle in Steigschächten untergebracht sind, erfolgt die horizontale Luftverteilung über ovale, in die Decke eingegossene Installationsrohre.

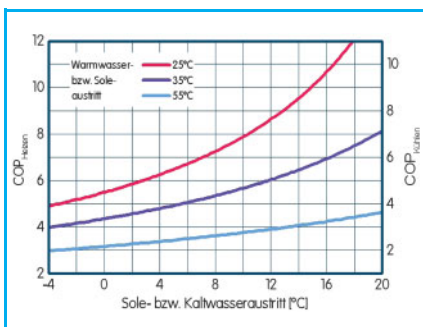


Bild 1: Einfluss der Medientemperaturen auf die Leistungszahl

Tabelle1: Gebäudetechnische Daten

Nutzfläche	3600 m ²	Beheizte/gekühlte HNF:	2650 m ²
Technische Daten Wärmepumpe:			
Heizbetrieb Nachts (BKT)		Kühlbetrieb Nachts (BKT)	
Heizleistung der BKT	118,0 KW	Kühlleistung der BKT	80,0 KW
El. Leistungsaufnahme WP	27,0 KW	El. Leistungsaufnahme WP	19,7 KW
Heizbetrieb Tags (RSE)		Kühlbetrieb Tags (RSE)	
Heizleistung der RSE	74,0 KW	Kühlleistung der RSE	23,0 KW
El. Leistungsaufnahme WP	27,0 KW	El. Leistungsaufnahme WP	4,9 KW
Mittlerer COP ohne Pumpen	3,98	Mittlerer COP ohne Pumpen	4,7
		COP bei direkter Kühlung	18
Technische Daten Geothermie:			
Anzahl Sonden	15 Stk.	Entzugsarbeit Heizenergie	221 MWh/a
Mittlere Sondenlänge	99 m	Entzugsarbeit Kühlenergie	180 MWh/a

Die Luftauslässe befinden sich für den Nutzer unsichtbar oberhalb der abgehängten Randstreifenelemente. Aufgrund der hohen Wirkungsgrade der Wärmerückgewinner von 80 % stellt sich ohne zusätzliche Nachwärmung eine Zulufttemperatur von mindestens 14°C bei -10°C Außentemperatur ein. Weil die Randstreifenelemente im Winter beheizt sind, kann sich die Zuluft auf dem Weg zur Aufenthaltszone weiter erwärmen. Bei extrem tiefen Außentemperaturen besteht zusätzlich die Option, die Zuluft zentral über ein Elektroheizregister mit 9 kW Heizleistung nachzuheizen. Die Abluftführung erfolgt über Nebenräume, Teeküchen und Nassräume.

Faustwert: 70 % über Betondecken – 30 % über Randstreifenelemente

Während die Betondecken als große thermische Speicher während der Nacht geladen werden müssen, können die Randstreifenelemente tagsüber nach der Raumtemperatur in ihrer Leistung individuell geregelt werden.

Für die Kombination von Bauteiltemperierung und Randstreifenelement hat sich folgende Regelstrategie als vorteilhaft erwiesen:

- unterhalb einer mittleren Außentemperatur von +12°C (24-Stunden-Mittel) erfolgt die zeitgesteuerte thermische Beladung der Betondecken mit Heizwärme. Oberhalb einer mittleren Außentemperatur von +16°C werden die Betondecken gekühlt.

Die Vorlauftemperaturregelung erfolgt in Abhängigkeit von der mittleren Außentemperatur und wird von der Wärmepumpe bei konstantem Massenstrom im Bereich von 24 bis 34°C je nach Anforderung zur Verfügung gestellt

- die Randstreifenelemente übernehmen während des Tages die Ausregelung der gewünschten Raumtemperatur. Dazu steht während der Heizperiode eine Vorlauftemperatur von ca. 34°C zur Verfügung, im Sommer von ca. 18°C. Jeder Raumregelkreis ist mit einem Durchflussregelventil ausgestattet, das über den Raumthermostat angesteuert wird
- in der Übergangszeit, also im Bereich zwischen 12 und 16°C Tagesmitteltemperatur, wird die Betondecke auf 21°C konstant gehalten. Durch den hohen Selbstregeleffekt ist eine so temperierte Decke in der Lage, sowohl Wärme aufzunehmen, d.h. zu kühlen, als auch Wärme abzugeben, also zu heizen
- oberhalb einer 24-Stunden-Tagesdurchschnittstemperatur von 16°C stellt die Gebäudeautomation je nach Außentemperatur (24-Stunden-Tagesdurchschnittstemperatur) Kaltwasser zwischen 17 und 19°C zur Verfügung. Bei < 20°C Wassertemperatur schaltet der Change-over-Thermostat die Funktion der Raumthermostate von Heizen auf Kühlen um, d.h. die Regelventile öffnen nun bei steigenden Raumtemperaturen
- das gebäudeseitige Hydrauliksystem ist im Dreileiterprinzip konzipiert.

Zwei getrennte Vorlaufleitungen für Tag- und Nachtbetrieb und ein gemeinsamer

- im Kühlfall werden die Erdsonden möglichst lange direkt zur Kühlung des Gebäudes genutzt, d.h. das im Winter durch den Wärmepumpenbetrieb ausgekühlte Erdreich wird durch reines Umwälzen des Fluids zur Kühlung genutzt. In dieser Phase arbeitet das geothermische Temperiersystem besonders wirtschaftlich. Mit 1 kWh Pumpenenergie können etwa 18 kWh „Nutzkälte“ transportiert werden. Etwa 80 Prozent der für den nächsten Tag voraussichtlich benötigten Kühlarbeit wird zwischen 22 und 6 Uhr in die Decke eingespeichert, 20 Prozent stehen tagsüber für die individuelle Raumtemperaturregelung über das Randstreifenelement zur Verfügung
- Die Wärmepumpe schaltet erst dann im Kühlbetrieb zu, wenn die Austrittstemperatur des Sondenkreislaufes auf über 17°C ansteigt. Bei Bürogebäuden beginnt der Kältemaschinenbetrieb der geothermischen Energiezentrale etwa ab Mitte August
- während des Kältemaschinenbetriebs arbeitet die sowohl auf Heiz- als auch auf Kühlbetrieb optimierte Geozent-Wärmepumpe mit einem COP bzw. einer Leistungszahl von durchschnittlich etwa 5 bis 6, was einer etwa doppelt so hohen Energieeffizienz wie der eines entsprechenden Kaltwassersatzes entspricht. Da bei erdgekoppelten Wärmepumpen die Kondensationstemperatur selbst bei vollem Kühlbetrieb nie über 30°C ansteigt, ist die Kälteversorgung auch bei hohen Außentemperaturen gesichert. Viele Betreiber konventioneller Klimaanlage machten bei den extrem hohen Außentemperaturen im Sommer 2003 die Erfahrung, dass gerade dann, wenn sie die Kälte am dringendsten brauchten, die Kälteerzeuger auf „Störung“ gingen, d.h. sie schalteten wegen zu hohem Druck im Kältekreislauf aus Sicherheitsgründen ab. Da eine geothermische Wärmepumpe bei weitgehend konstanten Verflüssiger- bzw. Verdampfungstemperaturen arbeitet, ist das Ausfallrisiko gering und die Lebensdauer des Aggregates bedeutend länger.

Der Kostenvergleich zu Alternativen gem. Bild 2 weist für die Variante D mit einer Erdsondewärmepumpe mit Kühlung im Vergleich zu einer konven-

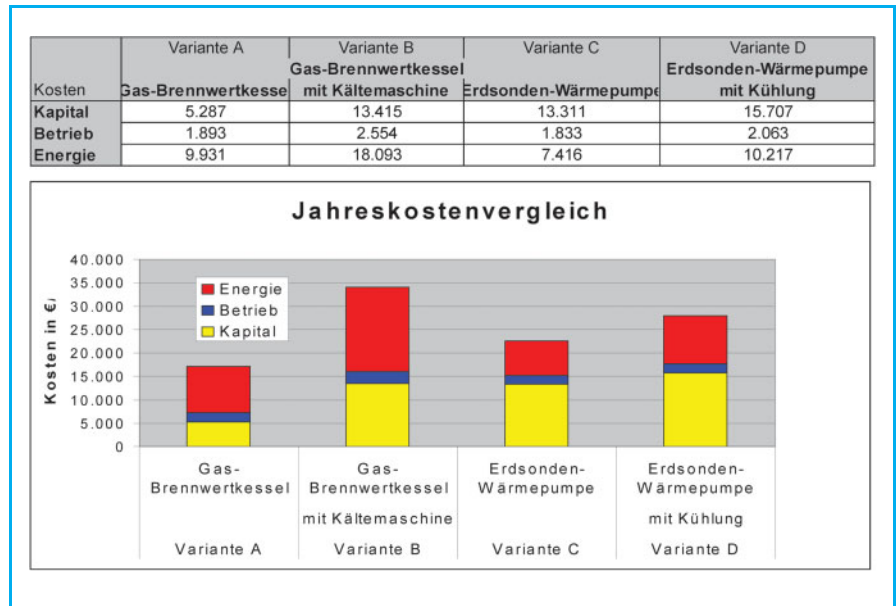


Bild 2: Vergleich der Investitionskosten

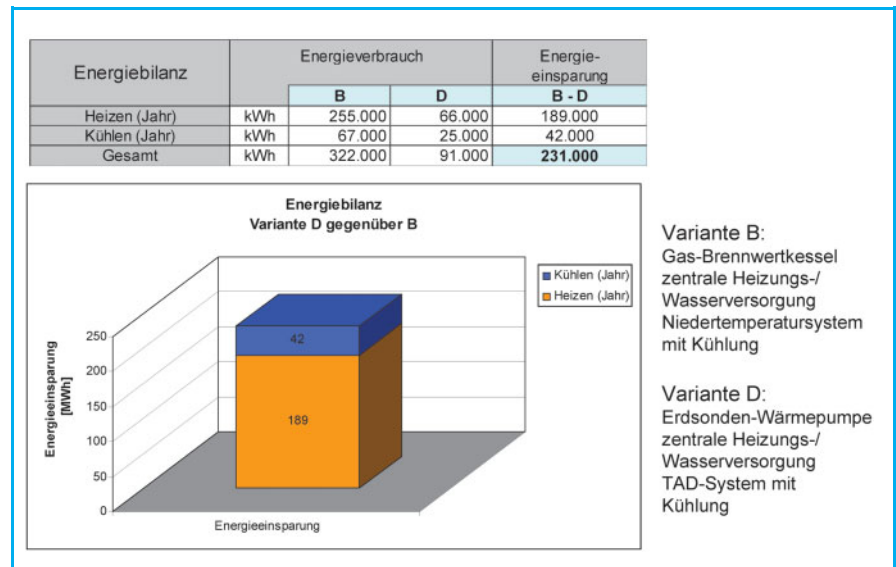


Bild 3: Energiebilanz

tionellen Anlage mit Brennwertkessel und Kältemaschine die mit Abstand höchsten Einsparungen auf. Für den Heizfall zeigen sich auch bei reinem Heizbetrieb trotz der hohen Investitionskosten für die Erdsonden-Wärmepumpe Kosteneinsparungen gegenüber der konventionellen Brennwertkesselösung. Die Auswertung der Energieverbrauchs-werte für die Varianten B und D weist für die geothermische Lösung eine Reduktion von 231 000 kWh per anno aus (Bild 3).

Im vorliegenden Fall vermindert sich – im Vergleich zu einer konventionellen Wärme-/Kälteerzeugung – der CO₂-Ausstoß

um rund 70 Tonnen pro Jahr; bezogen auf die Lebensdauer von 25 Jahren sind das immerhin 1750 Tonnen. Auch die Mieter profitieren über die zweite Miete von der hohen Effizienz des Heiz-/Kühlsystems: Zu den etwa 0,90 EUR/m² und Monat für Hausmeister und Verwaltung zahlen sie für die sehr komfortable Raumtemperierung nur etwa 0,90 EUR/m² und Monat.

Bei der Auslegung des Wärmepumpensystems wurden unterschiedliche Ansätze zur Dimensionierung der Wärmepumpeneinheit und Abbildung des Teillastbetriebes untersucht. Die entsprechenden Ergebnisse für die Teillastfälle

50–25–25 und 75–12,5–12,5 sowie die Auswirkungen des Hilfsenergiebedarfs für den Betrieb der Solepumpen sind in den Bildern 5 – 8 dargestellt.

Aus allen Diagrammen wird ersichtlich, dass der Hilfsenergiebedarf für den Betrieb der Solepumpen einen erheblichen Anteil am Gesamtenergieaufwand für den Betrieb der Systeme einnimmt. Im Teillastbetrieb verschlechtert sich der Gesamtwirkungsgrad drastisch, so dass die Systeme grundsätzlich unter Volllast taktend mit hinreichend langen Einzelzyklen betrieben werden sollten. Die Anpassung an die Teillasterfordernisse kann dann über die gebäudeinternen Speichermassen realisiert werden.

Die Bilder 9 – 11 zeigen darüber hinaus für die Betriebsweise die Bewertung der im Gebäude verfügbaren Heiz- und Kühlarbeiten im Jahresgang für verschiedene Betriebsweisen der geothermischen Anlage. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist hierbei die Betriebsweise im Kühlfall, wobei zwischen reiner freien Kühlung (Bild 9), freie Kühlung mit im Jahresgang anschließender Kühlung über eine umgeschaltete Wärmepumpe (Bild 10) und ausschließlicher Kühlung über eine umgeschaltete Wärmepumpe unterschieden wurde.

Aus den Diagrammen wird ersichtlich, dass zum einen der Heizbetrieb nahezu unabhängig von der Betriebsweise im Kühlfall ist. Zum anderen weisen insbesondere die Verläufe in Bild 10 aus, dass über weite Bereiche die freie Kühlung den erforderlichen Kältebedarf decken kann. Erst am Ende der Kühlphase ermöglichen die natürlichen Ressourcen nicht mehr die vollständige Deckung des erforderlichen Kältebedarfs (Bild 9), so dass hier auf den aktiven Betrieb der Kältemaschine gewechselt werden muss. Der reine Betrieb mit umgeschalteter Wärmepumpe zur Bereitstellung der Kühlleistung sichert zwar ganzjährig die Kältebereitstellung, erfordert jedoch einen höheren Energiebedarf für den Betrieb der Aggregate. Die ökonomisch und ökologisch optimale Betriebsweise entspricht somit dem Fall, der Bild 10 zugrunde gelegt wurde.

Resümee

Nach dem Jahrhundertsommer 2003 sind die Nutzer von Büroräumen viel stärker als früher an Raumklima-Bedingungen interessiert, die im Winter und Sommer akzeptable Raumtemperaturen

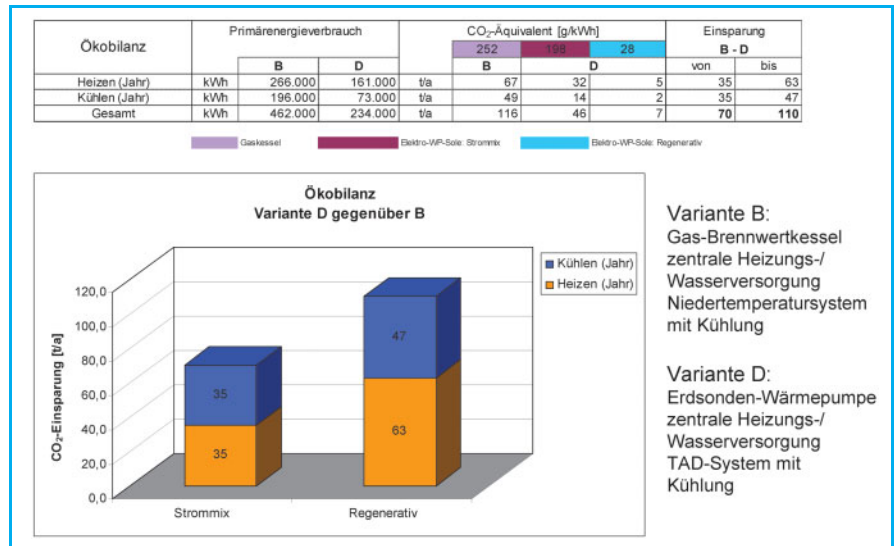


Bild 4: Ökologische Bilanz

Variante B:
Gas-Brennwertkessel
zentrale Heizungs-/
Wasserversorgung
Niedertemperatursystem
mit Kühlung

Variante D:
Erdsonden-Wärmepumpe
zentrale Heizungs-/
Wasserversorgung
TAD-System mit
Kühlung

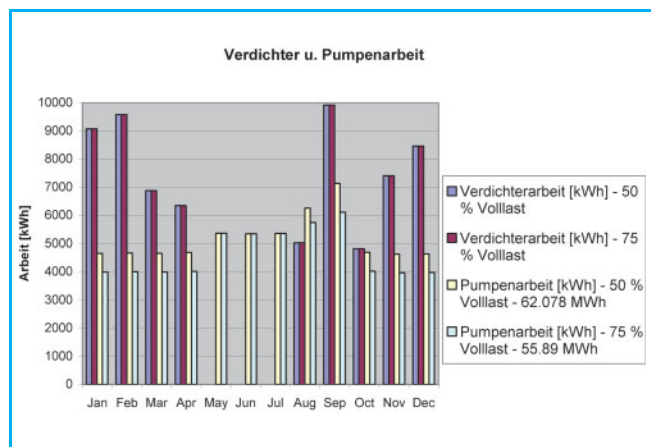


Bild 5: Einfluss der Betriebsweise – Heizen und Kühlen
Vergleich Betriebskosten mit 3 stufiger Wärmepumpe, Abstufungen 50–25–25 % und 75–12,5–12,5 %

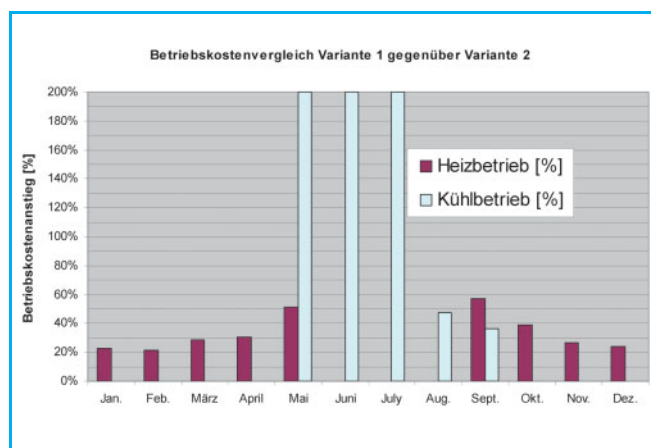


Bild 6: Einfluss Solepumpenarbeit Vergleich Betriebskosten mit unterschiedlichen Anteilen Solepumpenleistungen, Variante 1 mit 30 % elektrische Leistung (bez. auf el. Verdichterleistung) Variante 2 mit 10 % elektrische Leistung (bez. auf el. Verdichterleistung)

bei gleichzeitig niedrigen Kosten ermöglichen. Bei Neubauten bietet das Grundstück die einmalige Chance, das thermische Speicherpotenzial des Untergrundes im Sinne einer unabhängigen Energieversorgung in die Gebäudekonzeption einzubeziehen, wenn rechtzeitig vor

Baubeginn die örtlichen Möglichkeiten untersucht werden. Je nach geologischem Untergrund bietet sich der Einsatz einer geothermischen Wärmepumpe an, mit der das Gebäude umwelt-schonend über thermisch aktivierte Geschosstrenndecken oder abgehängte

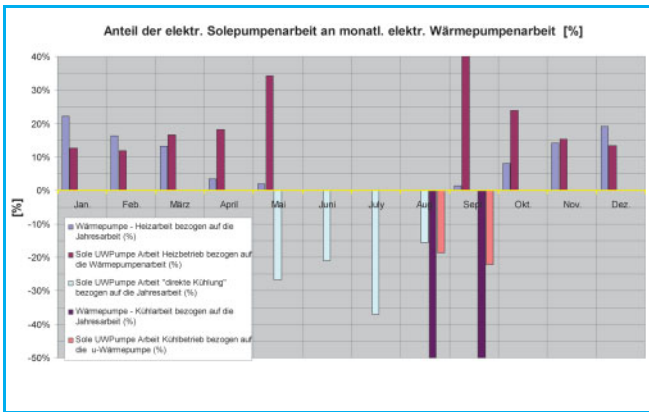


Bild 7: Beispiel Standardgebäude Vergleich Kostenanteile WP – Solepumpe (10%)

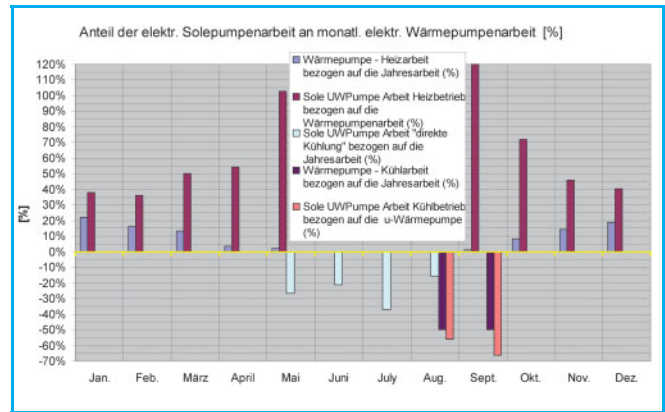


Bild 8: Beispiel Standardgebäude Vergleich Kostenanteile WP – Solepumpe (30%)

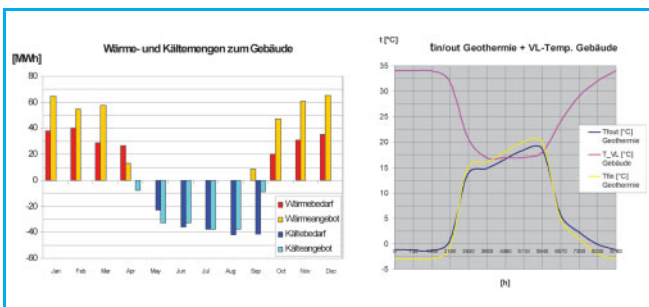


Bild 9: Wärmepumpe Heiz- und Kühlbetrieb, Berechnungsergebnisse Wärme- und Kältemengen, Temperaturen Heizbetrieb mit WP, Kühlbetrieb direkte Kühlung

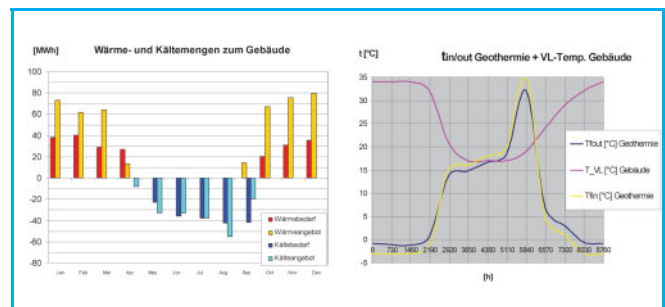


Bild 10: Wärmepumpe Heiz- und Kühlbetrieb. Berechnungsergebnisse Wärme- und Kältemengen, Temperaturen Heizbetrieb mit WP, Kühlbetrieb mit direkter Kühlung + umgeschalteter WP

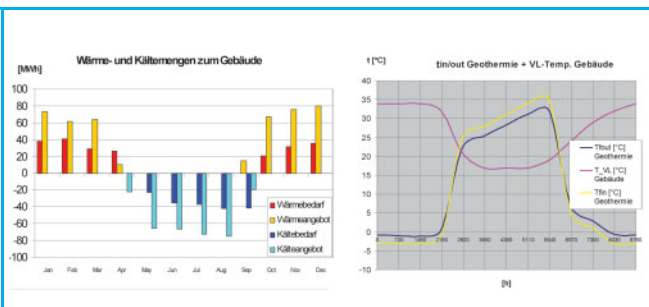


Bild 11: Wärmepumpe Heiz- und Kühlbetrieb Berechnungsergebnisse Wärme- und Kältemengen, Temperaturen Heizbetrieb mit WP, Kühlbetrieb mit umgeschalteter WP

Heiz- /Kühldecken geheizt und gekühlt werden kann. Eine wirtschaftlich interessante Lösung ist eine Kombination aus beiden, weil sich die Speichereigenschaft der Betondecke mit der Regelfähigkeit des Randstreifenelementes ideal ergänzt. Zudem benötigen größere Räume mit sichtbaren Betondecken zusätzliche Schallabsorptionsflächen,

die mit perforierten Randstreifenelementen sinnvoll geschaffen werden können.

Neben funktional eigenständigen Erdsonden bieten sich auch thermisch aktivierte Gründungspfähle (Energiepfähle), Schlitzwände oder Fundamentplatten als geothermische Quelle an. In der

VDI-Richtlinie 4640 sind die erwähnten Verfahren und ihre Einsatzgrenzen detailliert beschrieben. Erste Erfahrungen zeigen, dass bei Einsatz der Effizienz-optimierten Wärmepumpe Geozent die Heiz- und Kühlkosten eines Gebäudes nicht höher sind als bei nur beheizten Gebäuden. Bei den meisten Geothermie-Projekten amortisieren sich die Mehrinvestitionen auch ohne Fördermittel. Voraussetzung für eine wirtschaftliche Gesamtlösung ist eine frühzeitige Einschaltung entsprechender Fachplaner und ein integraler Planungsansatz.

Schlüsselwörter

- Wärmepumpe
- Bauteilkühlung
- Erdsonde
- Regelung
- Wirtschaftlichkeit