

Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen in Wohngebäuden - Theorie und Praxis

Ralf Dott, Andreas Genkinger, Norbert Lederle und Thomas Afjei
Institut Energie am Bau - Fachhochschule Nordwestschweiz
Sankt-Jakobs Strasse 84, CH-4132 Muttenz, www.fhnw.ch/iebau, ralf.dott@fhnw.ch

Zusammenfassung

Abstract

Wärmepumpen können neben Heizwärme und Warmwasser auch Kühlenergie bereitstellen, welche in Wohngebäuden durch steigende Behaglichkeitsansprüche im Sommer und steigende Wärmelasten verursacht wird. Vorrangig ist natürlich eine wirksame Reduktion der Wärmelasten mit einer guten Dämmung und wirkungsvollen Verschattung.

Im theoretischen Vergleich dreier Wärmepumpenkonzepte weist ein System mit Erdwärmesonden die höchste Effizienz in allen Betriebsarten auf. Es ist nur ein geringer Zusatzaufwand in der Anlagenerstellung notwendig. Eine erstaunlich hohe Effizienz, wenn auch deutlich unterhalb der passiven Kühlung, erreicht ein VRF¹-Multi-Split-Luft/Luft-Klimagerät, wobei bei der Wärmeabgabe im Raum über Konvektoren Geräuschen und Zugluft-Erscheinungen besondere Beachtung zu schenken ist. Alle Systeme erreichen eine gute thermische Behaglichkeit.

In zwei Feldmessungen konnten die gute thermische Behaglichkeit und die hohe Effizienz der passiven Kühlung mit Erdwärmesonden für ein Niedrigenergie-Einfamilienhaus und ein Niedrigstenergie-Mehrfamilienhaus bestätigt werden.

Besides space heating and domestic hot water, heat pumps can provide space cooling too, which is caused in dwellings by increasing comfort demands in summer and increased heat loads. However, the priority still is an effective reduction of heat loads with good thermal insulation and effective shading.

In the theoretical comparison of three heat pump concepts a heat pump systems with borehole heat exchanger shows the highest efficiency in all modes. Only a small additional investment is necessary. A surprisingly high efficiency achieved a VRF multi split air/air-conditioning unit, albeit significantly below the passive cooling. With convectors as heat supply system in the room, special attention is to pay to draft and noise phenomena. All systems achieve good thermal comfort.

In two field measurements the good thermal comfort and high efficiency of the passive cooling with borehole heat exchangers could be confirmed for a low-energy single family house and an ultra-low-energy apartment building.

¹ Variable Refrigerant Flow

1. Heizen und Kühlen in Wohngebäuden

Die Menschen in Europa verbringen einen grossen Teil ihrer Zeit in Gebäuden. Um den Energiebedarf zur Bereitstellung der thermischen Behaglichkeit auch bei steigenden Behaglichkeitsansprüchen im Sommer nicht steigen zu lassen sind effiziente und sparsame Systemlösungen erforderlich. Die Minimierung des zusätzlichen Energiebedarfs durch die sommerliche Kühlung ist eine Herausforderung für energieeffiziente Gebäude. Eine gute Dämmung, eine wirkungsvolle Verschattung und gegebenenfalls eine sommerliche Nachtlüftung reduzieren die externen Wärmelasten. Die internen Wärmelasten in Wohngebäuden sind deutlich geringer als beispielsweise in Bürogebäuden. Wärmepumpen können neben Heizwärme und Warmwasser auch Kühlenergie bereitstellen. Dabei können die für die Wärmepumpe erschlossenen Wärmequellen oft auch zur passiven Kühlung genutzt und meist einfach in existierende Systemkonfigurationen integriert werden. In einer theoretischen Untersuchung wurden drei grundlegende Wärmepumpenkonfigurationen für die Funktionen Heizen (H), Warmwasserbereitung (W) und Kühlung (C) untersucht und gegenübergestellt. Ein kurzer Einblick wird im Folgenden vorgestellt. Ergänzend dazu wurden an zwei Feldmessungen praktische Erfahrungen mit einer passiven Kühlung mit Erdwärmesonden gesammelt und Kenngrössen zu Energie und Raumklima ausgewertet.

2. Systemvergleich in Simulationen

Kühlen von Wohngebäuden muss als ergänzende Behaglichkeitssteigerung betrachtet werden im Gegensatz zur Warmwasserbereitung oder Beheizung. Daher werden Wärmepumpensysteme für Heizen und Warmwasserbereitung betrachtet, mit welchen zusätzlich auch gekühlt werden kann. Dabei ist das Ziel eindeutig nicht die strikte Einhaltung einer maximalen Raumtemperatur, sondern eine Steigerung der thermischen Behaglichkeit durch eine Kappung von Temperaturspitzen oder eine sanfte Absenkung der Raumtemperatur. Der Vergleich der drei Wärmepumpensysteme zeigt deren Verhalten, angewendet an einem MINERGIE® Referenzgebäude mit 200 m²_{EBF} zur Abdeckung der Funktionen Heizen, Warmwasserbereitung und Kühlen. Dabei wird neben dem Gebäude die Wärmepumpe inklusive Regelung abgebildet. Die Systeme SEK1, SEK2 und SEK3 sind schematisch in Abb. 1 dargestellt. System SEK1 basiert auf einem VRF-Multi-Split Luft/Luft-Klimagerät, welches im Umkehrbetrieb auch zur Beheizung des Gebäudes eingesetzt wird. Die Warmwasserbereitung erfolgt separat über eine der Wohnungslüftungsanlage nachgeschaltete Abluft-Wärmepumpe. Im System SEK2 deckt eine Aussenluft-Wärmepumpe alle drei Funktionen H, W & C im aktiven Betrieb ab. Mit einer Niedertemperatur-Fussbodenheizung wird geheizt und gekühlt. Das System SEK3 nutzt eine Erdwärmesonde als Wärmequelle für die WP-Heizung und Warmwasserbereitung sowie als Wärmesenke für passive Kühlung.

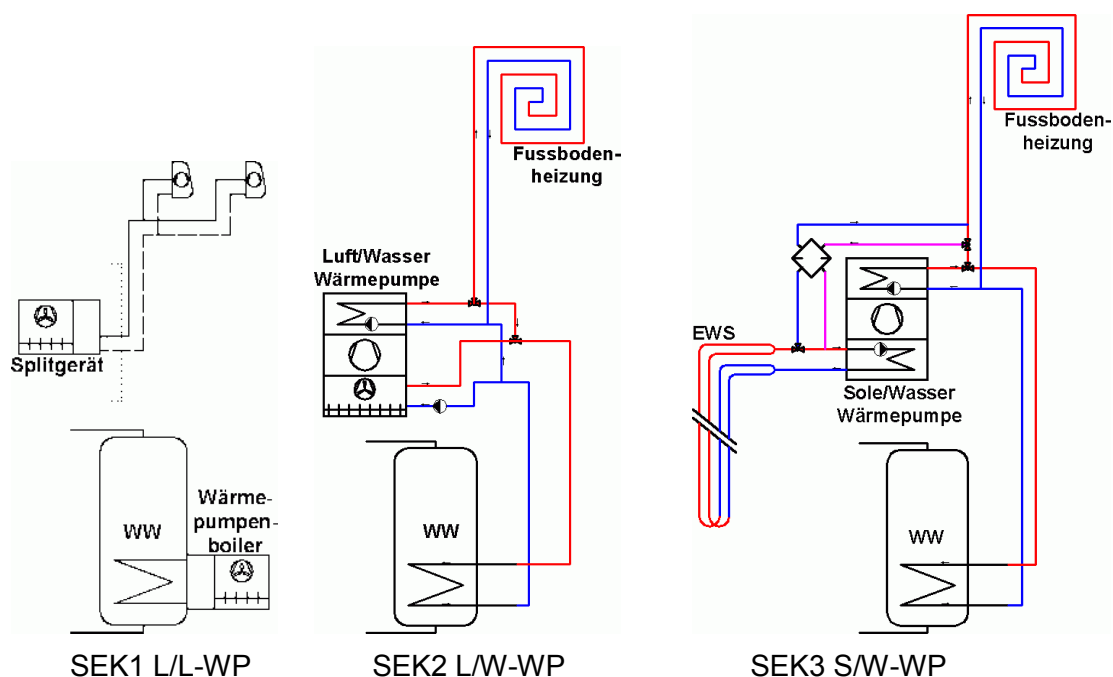


Abb. 1: Aufbau der Schaltungen für Heizen, Warmwasser & Kühlen

Alle drei Systeme erreichen eine gute thermische Behaglichkeit bezogen auf die operative Raumtemperatur in der Winter- wie auch in der Sommerperiode. Allerdings unterscheiden sich die Charakteristiken der operativen Raumtemperaturen aufgrund der Wärmeübergabesysteme, dargestellt in Abb. 2, für das VRF-Mult-Split-System SEK1 mit Konvektor (links) und für die Fussbodenheizung in System SEK3 (rechts). Für das System SEK1 ist eine deutliche Grenzkurve mit einer konstanten operativen Raumtemperatur erkennbar. Durch die Übergabe der Heiz-/Kühlleistung direkt im Raum ist ein einfacheres Einstellen und Erreichen der gewünschten Raumtemperatur möglich. Für die Systeme SEK2 und SEK3 zeigt sich eine breitere Streuung der Raumtemperatur bei konstanter Aussentemperatur. Dies ist bedingt durch die zeitliche Pufferwirkung des Fussbodenaufbaus und damit verzögerte Einbringung der Kühlleistung in den Raum.

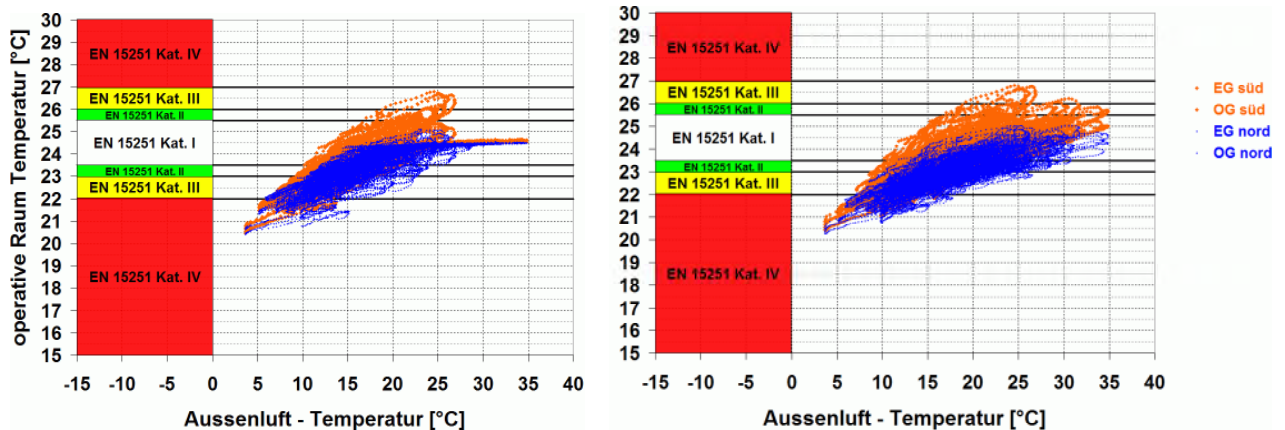


Abb. 2: Verteilung der operativen Raumtemperatur in Bezug zur Aussenluft-Temperatur für die Sommerperiode; links: SEK1, rechts: SEK3

Die energetische Auswertung erfolgt anhand der in Abb. 3 dargestellten Bilanzgrenzen. Der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad (WNG) qualifiziert die Wärmeerzeugung und wird berechnet als Summe der erzeugten Wärme dividiert durch den für die Wärmeerzeugung notwendigen Aufwand inklusive der Erschliessung der Wärmequelle. Der System-Nutzungsgrad (SNG) gibt das Verhältnis von Nutzwärme dividiert durch die Summe aller Aufwendungen im System wieder. Die Kenngrößen beziehen sich auf die Energiesummen über einen definierten Zeitraum (z.B. Winter-, Sommerperiode oder Jahr) und werden hier nur für die Funktionen Heizen, Warmwasserbereitung und Raumkühlung betrachtet. Das Lüftungssystem war in den Simulationen für alle Systeme gleich angesetzt und nicht in die Bilanzgrenze einbezogen.

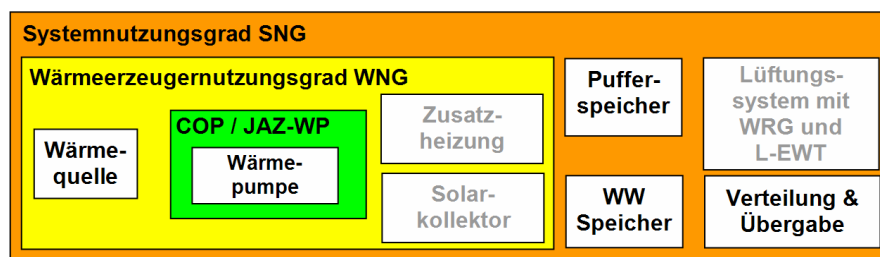


Abb. 3: Definition der Effizienz-Kennzahlen und Bilanzgrenzen für die energetische Bewertung von Wärmepumpensystemen

In Abb. 4 sind die erreichten Wärmeerzeuger-Nutzungsgrade gegenübergestellt. Die insgesamt knapp schlechteste Effizienz erreicht eine Luft/Wasser-Wärmepumpe mit aktiver Kühlung im Umkehrbetrieb. Einerseits gestaltet sich die zielgerichtete Erreichung behaglicher Raumtemperaturen mit einem trägen Wärmeübergabesystem im sommerlichen Kühlbetrieb schwieriger, woraus ein erhöhter Klimakältebezug resultieren kann. Andererseits erreicht dieses System zwar einen akzeptablen Warmwasser-WNG von 3.3, aber die im Vergleich schlechtesten Effizienzen im Heizbetrieb mit 3.3 und Kühlbetrieb mit 2.4. Ein Vorteil ist der geringe Aufwand auf der Anlagenseite, da mit einer Maschine alle drei Betriebsmodi bereitgestellt werden können.

Eine unerwartet hohe Effizienz erreicht eine Multi-Split VRF Luft/Luft-Wärmepumpe mit 3.7 im Heizbetrieb und 4.1 im Kühlbetrieb. Mit diesem System kann die beste thermische Behaglichkeit

bezogen auf die operative Raumtemperatur erreicht werden. Die Adaption an wechselnde Lastbedingungen hinsichtlich Temperatur und Luftfeuchte, verursacht durch wechselnde Verschattung oder Personenbelegung, gelingt am einfachsten. Somit kann auch der geringste Klimakältebezug erreicht werden. Ein Nachteil eines solchen Systems ist die im ganzen Gebäude vorhandene, grosse Kältemittelmenge. Weiterhin fordert die Wärmeübergabe im Raum mit einem Umluftsystem bei der Planung eine besondere Beachtung der potenziellen Geräuschemissionen einerseits und der Vermeidung von Zugluft-Erscheinungen andererseits. Die Warmwasserbereitung mit einer Abluft-Wärmepumpe, welche für System SEK1 der bei allen Systemen einheitlichen Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung nachgeschaltet ist, kann zwar eine kostengünstige Lösung sein, weist aber eine nur geringe Effizienz auf.

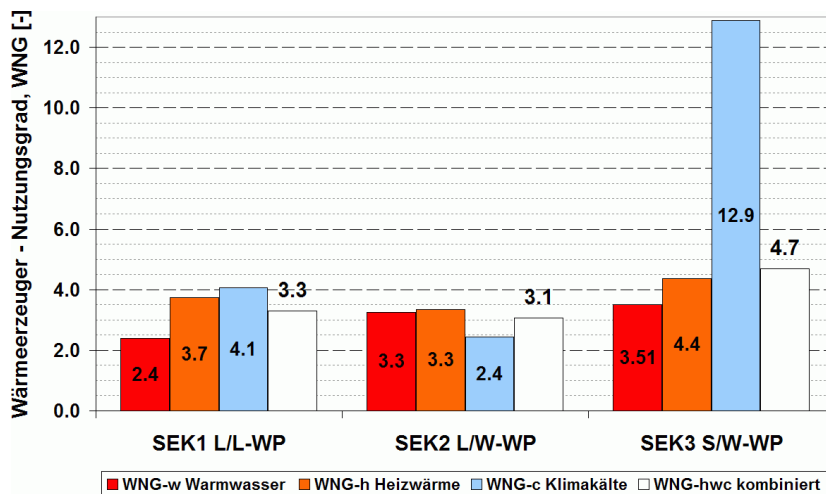


Abb. 4: Gegenüberstellung der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrade der Funktionen Heizen, Warmwasser, Kühlen und kombiniert für die Systemvarianten SEK1, SEK2 und SEK3

Die mit Abstand höchste Effizienz erreicht System SEK3 für die passive Kühlung mit Erdwärmesonden mit einem WNG von 12.9 für den Kühlbetrieb und 4.7 über alle Betriebsarten kombiniert. Der Aufwand, eine Sole/Wasser-Wärmepumpe mit einer Kühlfunktion zu ergänzen, ist gering. Die Wärmeabfuhr ins Erdreich begünstigt zudem die Effizienz der sommerlichen Warmwasserbereitung. Vergleicht man in Abb. 5 den jahreszeitlichen Verlauf der erzeugten Wärme für Klimakälte mit der Anhebung der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur, dann zeigt sich nur eine geringe Phasenverschiebung. Mit anderen Worten: Der Wärmeeintrag im Sommer kann nicht in den Winter gerettet werden.

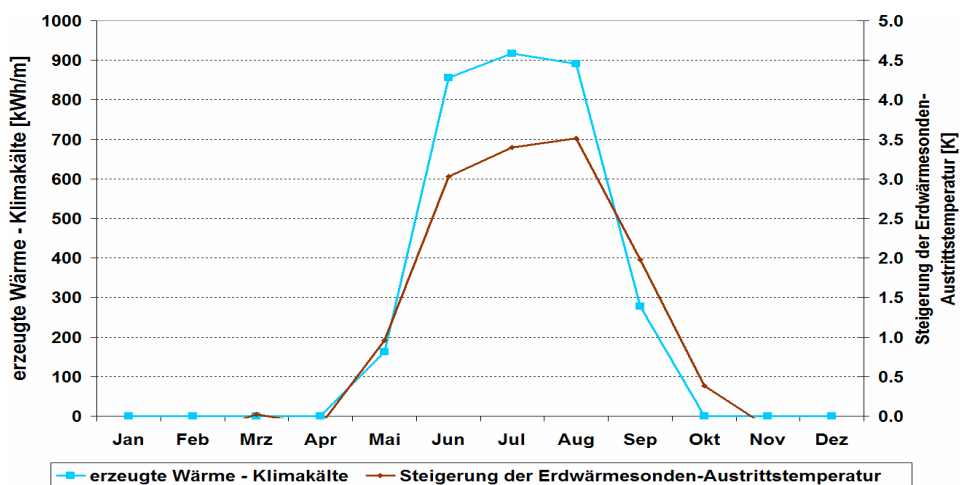


Abb. 5: Jahreszeitliche Korrelation von im Kühlfall abgeführter Raumwärme in die Erdwärmesonde und der Steigerung der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur gegenüber dem Betrieb ohne Kühlung für ein MINERGIE® Gebäude mit geringer Verschattung (25%)

Der Einfluss der eingetragenen Wärme in die Erdwärmesonde aus der Raumkühlung auf die Steigerung der Austrittstemperatur der Erdwärmesonde im Folgemonat ist gering und zeigt sich darin, dass im Vergleich zur Variante ohne Wärmeeintrag das Maximum zwar einen Monat später erreicht wird, aber nur leicht höher liegt als der vorherige Wert. Im Oktober, dem ersten Monat nach der Kühlperiode, kann zwar noch eine Steigerung festgestellt werden, diese fällt mit 0.3 K allerdings sehr gering aus. Es ist also auch in der Monatsbilanz nur ein sehr geringer Wärmespeichereffekt in der Erdwärmesonde erkennbar. Die Steigerung der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur in den Monaten Mai bis Oktober kann mit hinreichender Genauigkeit als proportional zur abgeführten Wärme in die Erdwärmesonde betrachtet werden.

Für den normalen DesignReferenceYear-Klimadatensatz des Standortes „Basel-Binningen“ gemäss SIA 2028 [3] ergeben sich die in Abb. 6 dargestellten Kühlbetrieb-Laufzeiten abhängig von der Kühlgrenze bei einer gleitenden Mittelung der Aussenluft-Temperatur über 24 Stunden. Daraus folgt, dass für eine mit 21 °C hoch angesetzte Kühlgrenze, sinnvoll zur Kappung der Temperaturspitzen, von einer Laufzeit von ca. 500 Stunden im Jahr ausgegangen werden kann. Mit einer Kühlgrenze oberhalb von 22 °C ist die Kühlung de facto deaktiviert und nur ein schnell reagierendes Wärmeübergabesystem kann noch einen kurzfristigen Einfluss auf die Spitzentemperaturen nehmen. Eine sanfte Dauerkühlung über die Sommerperiode mit einer Kühlgrenze zwischen 17 °C und 19 °C führt zu Laufzeiten zwischen 1500 und 2000 Stunden pro Jahr.

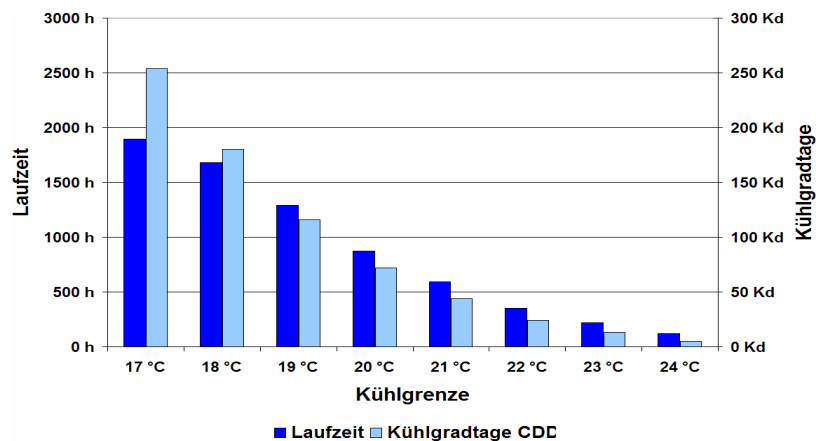


Abb. 6: Laufzeit im Kühlbetrieb in Bezug zur über 24 Stunden gleitend gemittelten Aussentemperatur für den Klimadatensatz Basel-Binningen

3. Erfahrungen in Feldmessungen

Im Rahmen von Feldmessungen wurden Daten zu Raumklima, erzeugter und abgeführter Wärme sowie zum Elektrizitätsverbrauch von zwei Wärmepumpenanlagen erfasst. Eine der Anlagen befindet sich im Mehrfamilienhaus „CosyPlace“ in Basel-Stadt (Abb. 7 links und [1]), die zweite in einem Einfamilienhaus in Muolen SG (Abb. 7 rechts). Die Messperioden erstreckten sich zwischen Herbst 2007 und Herbst 2009 für die Anlage im CosyPlace sowie von Anfang 2009 bis Frühling 2010 für diejenige in Muolen. Die Eckdaten beider Anlagen sind in untenstehender Tab. 1 zusammengestellt. Im Folgenden werden exemplarisch einzelne Effekte anhand der Messergebnisse aus den Feldobjekten aufgezeigt.



Abb. 7: Ansichten der beiden Feldmessobjekte

Objekt	CosyPlace	Muolen
Standort	Basel BS, 316 m.ü.M.	Muolen SG, 492 m.ü.M.
Exposition	Nordhang, freistehend	ebenes Gelände, freistehend
Fertigstellung	2007	2008
Baustandard	Minergie-P®	Minergie®
EBF	1064 m ²	279 m ²
Wohneinheiten	5	1
Bewohner	9 Erwachsene, 3 Kinder	2 Erwachsene, 1 Kind
Nennleistung WP (B0/W35)	15.5 kW	8.4 kW
Sondenlänge	2 x 130 m	1 x 150 m

Tab. 1: Gebäudedaten der beiden Feldmessungs-Objekte in Basel (BS) respektive Muolen (SG)

3.1 Energie- und Effizienzkennwerte

Beide Anlagen zeigten in den Messungen eine gute Effizienz, sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb. Die energetischen Kennwerte der beiden Gebäude sind in Tab. 2 zusammengefasst. Im Gebäude CosyPlace wurde die Regelung des Kühlbetriebs innerhalb der Messperiode umgestellt. Auf die Periode nach dieser Umstellung fallen fast 2/3 der abgeführten Wärme, im Wochenmittel wurde mit der optimierten Regelung ein Wärmereizgenutzungsgrad von 15.2 erreicht.

	CosyPlace	Muolen
Messperiode	Winter 2008/2009 Sommer 2009	Winter 2009/2010 Sommer 2009
erzeugte Wärme Heizen	32'850 kWh	9'186 kWh
erzeugte Wärme Warmwasser (Winter / Sommer)	7'258 / 5'552 kWh	1'522 / 765 kWh
abgeführte Wärme Kühlen	3'637 kWh	1'058 kWh
WNG Heizbetrieb	4.3	3.8
SNG Heizbetrieb	4.3	3.7
WNG Warmwasserbetrieb (Winter/Sommer)	2.5 / 2.9	2.8 / 3.6
SNG Warmwasserbetrieb (Winter/Sommer)	1.7 / 1.7	2.7 / 3.4
WNG Kühlbetrieb	8.1	7.3
SNG Kühlbetrieb	7.3	7.1
gesamte bezogene Elektrizität für Heiz-, Warmwasser- und Kühlbetrieb	12'968 kWh	3'657 kWh
WNG Gesamt	3.8	3.8
mittlere spezifische Kühlleistung bezogen auf die Nettogeschossfläche	10 W/m ² _{NGF}	7.5 W/m ² _{NGF} (max. 29 W/m ² _{NGF})

Tab. 2: Energie- und Effizienzkennwerte der beiden Gebäude

3.2 Aufwand für die passive Kühlung

Im passiven Kühlbetrieb wird lediglich Elektrizität für die Umwälzpumpen sowie die Regelung benötigt. Im Gebäude "CosyPlace" erfolgt die Versorgung der Fussbodenheizung mit einer hoch-effizienten, elektronisch geregelten Permanentmagnet-Synchronmotor-Pumpe, welche ihre Leistung an den infolge der Raumthermostaten variierenden Volumenstrom anpassen kann. Diese

Umwälzpumpe bezieht lediglich eine Leistung zwischen 30 W bis 40 W und verbraucht so im Heizbetrieb nur rund 2 % des gesamten Elektrizitätsbezuges. Im Kühlbetrieb fallen mit 48 kWh rund 10 % des Elektrizitätsbezuges zu Lasten der Umwälzpumpe im Fussbodenkreis. Hauptverbraucher bildet mit 427 kWh die Umwälzpumpe der Erdwärmesonde.

3.3 Verhalten der Erdwärmesonde

Den Zusammenhang zwischen erzeugter resp. abgeführter Wärme und der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur im Betrieb zeigt Abb. 8 exemplarisch für die Anlage im CosyPlace im Sommer 2009. Die winterlichen Sonden-Austrittstemperaturen liegen im Tagesmittel zwischen 0 °C und 7 °C. Durch den geringer werdenden Wärmeentzug im Frühjahr steigen die Werte auf etwa 10 °C im Mai/Juni. Gut erkennbar ist jeweils das Ansteigen um 3...5 K im Kühlbetrieb und das rasche Absinken danach. Durch eine Regloptimierung anfangs August wurde der Wärmeeintrag in die Sonde nochmals gesteigert, wodurch sich die Tagesmittelwerte der Austrittstemperaturen bis 16.4 °C steigern. Durch den wegfallenden Kühlbetrieb ab September stellen sich rasch wieder Werte um 10 °C ein, ein bedeutender Speichereffekt kann nicht beobachtet werden.

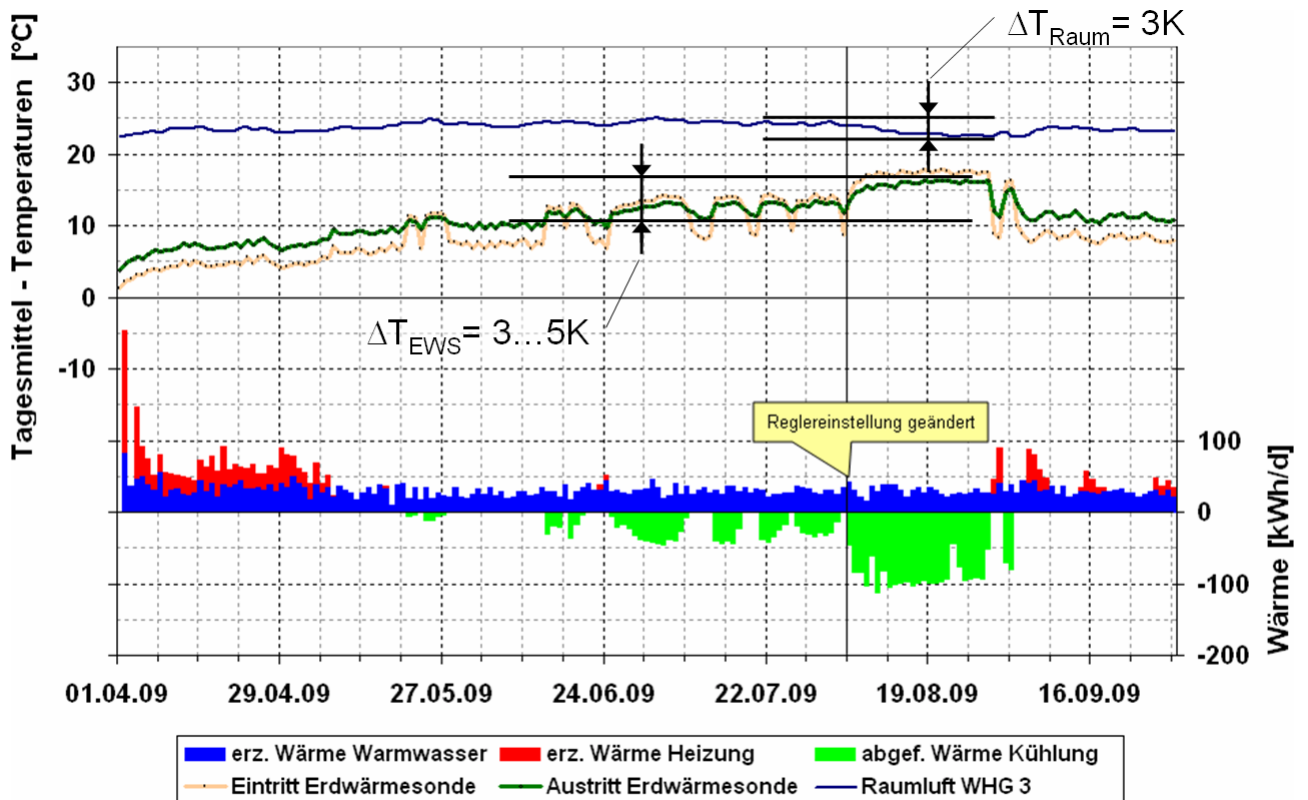


Abb. 8: Auswertung CosyPlace: Erzeugte resp. abgeführte Wärme im Zusammenhang zu den Betriebstemperaturen der Erdwärmesonde. Messperiode Sommer 2009.

3.4 Einfluss der passiven Kühlung auf die Raumtemperatur

Für das Gebäude in Muolen wurden die Innentemperaturen bei einer Periode ohne Kühlung, während einer Ferienabwesenheit der Bewohner, und einer Periode mit Kühlung ausgewertet, um den Einfluss der passiven Kühlung aufzuzeigen. Dabei wurden die Zeitabschnitte so gewählt, dass die mittlere Aussentemperatur beider Perioden einander entspricht. Die Ergebnisse in Abb. 9 zeigen deutlich, dass mit dem im Gebäude installierten passiven Kühlsystem die Temperatur der Raumluft im Mittel um etwa 3 K abgesenkt werden kann. Nachdem die passive Kühlung nach der Ferienabwesenheit aktiviert wurde, war diese an den ersten beiden Tagen nahezu durchgehend in Betrieb und konnte die Raumtemperatur bis zum zweiten Tag bereits um etwa 2 K absenken. Innerhalb dieses Zeitraums wurde etwa 50% mehr Wärme aus dem Gebäude abgeführt als im Durchschnitt während der Sommerperiode.

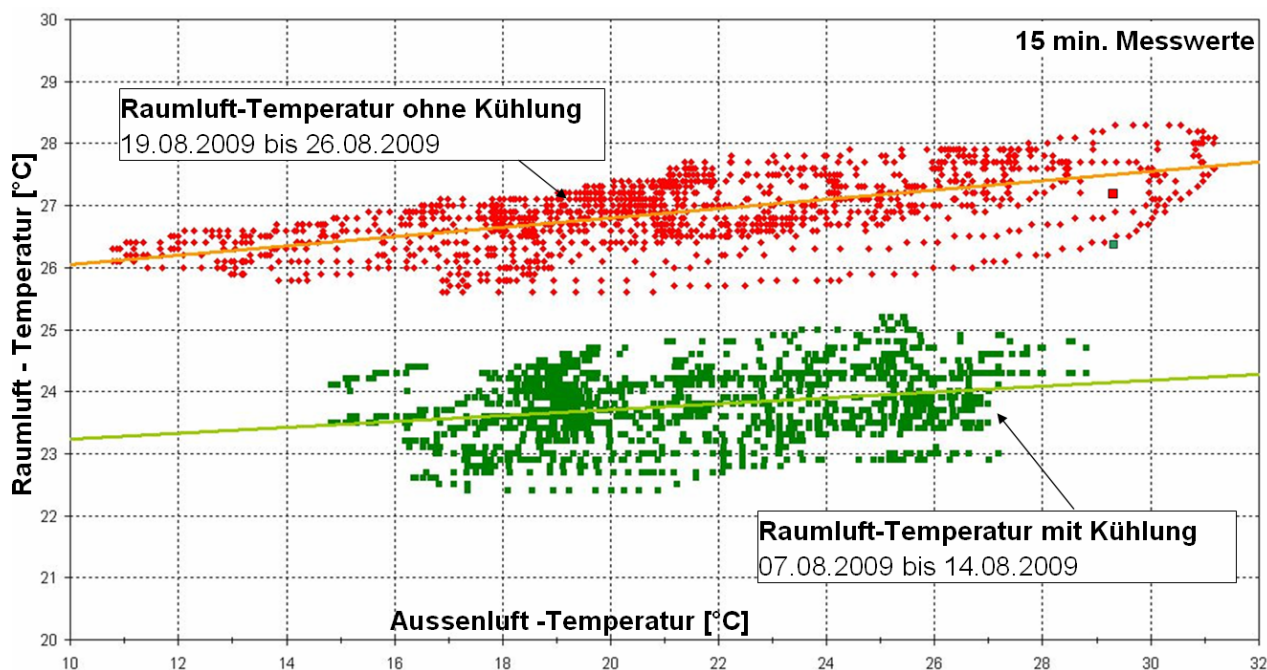


Abb. 9: Energiebezug und Effizienzkennwerte der beiden Gebäude (Messperiode 2008/2009). Im Elektrizitätsbezug sind jeweils alle Komponenten einberechnet (Umwälzpumpen, Wärmepumpe, Regelung)

4. Ausblick

Die Feldmessungen und theoretischen Untersuchungen im Rahmen dieser Projekte werden im Sommer 2010 abgeschlossen. Zentrale Aspekte sind der bedarfsorientierte Einsatz der Raumkühlung sowie die Steigerung der Systemeffizienz. In der praktischen Umsetzung fordert der Übergang zwischen Heiz- und Kühlbetrieb die Reduktion allzu grosser Sicherheitsreserven, damit die thermische Behaglichkeit neben der Winterperiode auch in der Sommerperiode gesteigert werden kann ohne den Energieaufwand unnötig zu steigern. Die passive Kühlung mit Erdwärmesonden zeigte sich als System mit der höchsten Effizienz, einer guten thermischen Behaglichkeit und geringem Zusatzaufwand in der Anlagenerstellung. Eine erstaunlich gute Effizienz, wenn auch deutlich unterhalb der passiven Kühlung, erreichen VRF-Multi-Split-Klimageräte. Mit steigender Effizienz des Kältemittelkreises nimmt die Bedeutung der Effizienz und des bedarfsorientierten Einsatzes der Nebenaggregate zu.

5. Verdankungen

Die vorgestellten Projekte liefern einen Beitrag zum Annex 32 im IEA Wärmepumpen - Programm mit dem Titel "Economical Heating and Cooling Systems for low energy houses" [2], der in einer anderen Session vorgestellt wird.

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesamt für Energie, die Viessmann (Schweiz) AG, Geschäftsbereich SATAG Thermotechnik und das Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt. Weiterhin gedankt sei den an den Bauvorhaben beteiligten Unternehmen sowie den Bewohnern für die gute Zusammenarbeit.

6. Literatur/Referenzen

- [1] A. Genkinger, R. Dott, Th. Afjei, A. Witmer; **Sanfte Kühlung mit Erdwärmesonden im MINERGIE-P® Wohngebäude Cosy Place**, Schlussbericht BFE, Muttenz, Februar 2010, CH
- [2] C. Wemhöner, **IEA HPP Annex32 – Economical Heating and Cooling for low energy houses**, Tagungsbeitrag, 16. Statusseminar Energie- und Umweltforschung im Bauwesen, Zürich, Sep. 2010, <http://www.annex32.net>
- [3] SIA2028:2008. **Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik**. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA. Zürich 2008