



Schlussbericht 22. Dezember 2010

SEK - STANDARDLÖSUNGEN ZUM ENERGIEEFFIZIENTEN HEIZEN UND KÜHLEN MIT WÄRMEPUMPEN

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Wärmepumpen, WKK, Kälte
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

Viessmann (Schweiz) AG, Geschäftsbereich SATAG Thermotechnik, CH-9320 Arbon

Auftragnehmer:

Fachhochschule Nordwestschweiz - FHNW
Institut Energie am Bau - IEBau
Sankt-Jakobs-Strasse 84
CH-4132 Muttenz
www.fhnw.ch/iebau

Autoren:

Ralf Dott, IEBau-FHNW, ralf.dott@fhnw.ch
Carsten Wemhöner, IEBau-FHNW, carsten.wemhoener@fhnw.ch
Thomas Afjei, IEBau-FHNW, thomas.afjei@fhnw.ch

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

BFE-Programmleiter: Thomas Kopp, tkopp@hsr.ch

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 151922 / 101579

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Zusammenfassung	5
Abstract	5
Résumé	6
1. Grundlagen und Vorgehen	7
1.1. Motivation für die Durchführung des Projekts	7
1.2. Zielsetzung und Lösungsweg	8
1.3. Marktsituation	9
1.4. Auswertemethodik und Gütekriterien	10
1.4.1. Energetische Bewertung	10
1.4.2. Behaglichkeitsbewertung	13
1.5. Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Feldmessungen	16
1.5.1. Feldmessung Muolen	16
1.5.2. Feldmessung CosyPlace	16
2. Systemlösungen	17
2.1. Wie kann man mit Heizwärmepumpenanlagen kühlen?	17
2.2. Wie vorgehen für eine energieeffiziente Kühlung?	18
2.3. Welche technischen Schaltungen sind möglich?	19
2.3.1. Luft/Luft-Wärmepumpe	21
2.3.2. Luft/Wasser-Wärmepumpe	22
2.3.3. Sole/Wasser-Wärmepumpe	24
2.3.4. Minergie-P / Passivhaus Kompaktgeräte	25
3. Systemvergleich hinsichtlich Energie und thermischer Behaglichkeit	26
3.1. Vergleich der Systeme SEK1, SEK2, SEK3	28
3.1.1. Welche thermische Behaglichkeit wird erreicht?	28
3.1.2. Wie hoch ist der Aufwand und welche Effizienz kann erreicht werden?	31
3.1.3. Fazit	33
3.2. Welchen Einfluss hat der simultane Warmwasser- und Kühlbetrieb?	34
3.2.1. Welche thermische Behaglichkeit wird erreicht?	34
3.2.2. Wie hoch ist der Aufwand und welche Effizienz kann erreicht werden?	35
3.2.3. Fazit	37
3.3. Wie wirkt sich Minergie-P® gegenüber Minergie® aus?	38
3.3.1. Welche thermische Behaglichkeit wird erreicht?	38
3.3.2. Wie hoch ist der Aufwand und welche Effizienz kann erreicht werden?	39
3.3.3. Fazit	40
3.4. Wirkung der passiven Kühlung	41
3.4.1. Welche thermische Behaglichkeit wird erreicht?	41
3.4.2. Wie hoch ist der Aufwand und welche Effizienz kann erreicht werden?	42
3.4.3. Fazit	43
3.5. Einfluss der passiven Kühlung auf die Erdwärmesonde als Wärmequelle	44
3.5.1. Welche thermische Behaglichkeit wird erreicht?	44
3.5.2. Wie hoch ist der Aufwand und welche Effizienz kann erreicht werden?	45
3.5.3. Fazit	47
4. Jahresnutzungsgrad-Rechenmethode für die passive Kühlung mit Erdwärmesonden	48
4.1. Charakteristik	49
4.2. Aufwandsberechnung für die passive Kühlung	50
4.2.1. Bestimmung der Laufzeit im passiven Kühlbetrieb	50
4.2.2. Sensitivitätsanalyse der Komponenten-Effizienz	52
4.2.3. Fazit	55
4.3. Nutzungsgrad der passiven Kühlung	56
4.4. Einfluss der passiven Kühlung auf Heiz- und Warmwasserbetrieb	57
4.4.1. Analyse der Einflüsse	57
4.4.2. Modell 1 – Ausnutzungsgrad des Temperatursteigerungspotenzials	61
4.4.3. Modell 2 – adiabater Kurzzeit-Wärmespeicher	63
4.4.4. Validierung Rechenmodell mit Simulationen	70
4.4.5. Fazit	71
4.5. Integration der passiven Kühlung in die BIN-Methode	72

4.5.1. Vergleich BIN-Methode und Simulation für Heiz- und Warmwasserbetrieb.....	72
4.5.2. Vergleich BIN-Methode / Simulation für Heiz-, Warmwasser- und passiven Kühlbetrieb.....	73
4.5.3. Wie setzt sich die Verbesserung des Wärmeerzeuger-Nutzungsgrades zusammen?	75
4.5.4. Zuordnung des Stand-By Aufwandes zu den Betriebsarten.....	75
Symbolverzeichnis	79
Symbole.....	79
Abkürzungen.....	79
Literaturverzeichnis	80
 Anhang: Rechenbeispiel Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad.....	 81
Anhang: Annahmen und Randbedingungen	82

Zusammenfassung

Das Projekt SEK möchte zeigen, mit welchen Wärmepumpensystemen der sommerliche Komfort im Wohnbereich energieeffizient gesteigert werden kann. Von Vorteil ist dabei, dass Wärmepumpen neben Heizwärme und Warmwasser auch Kühlenergie bereitstellen können. Steigende Wärmelasten und höhere Behaglichkeitsansprüche im Sommer können auch in Wohnbauten zu einem Kühlbedarf führen. Aus Gründen der Energieeffizienz sind jedoch vor dem Einsatz einer Kühlfunktion alle Möglichkeiten zur Reduktion der Wärmelasten auszuschöpfen, insbesondere eine wirkungsvolle Verschattung.

Im theoretischen Vergleich dreier Wärmepumpenkonzepte wurden Systemlösungen mit Multi-Split-Wärmepumpen-Klimageräten (Luft/Luft-Geräte mit variablem Kältemittelmassenstrom (VRF)), Luft/Wasser-Wärmepumpen und erdgekoppelte Sole/Wasser-Wärmepumpen analysiert und bewertet. Ein System mit Erdwärmesonden weist den höchsten Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad sowohl über alle Betriebsarten mit 4.7, wie auch in den einzelnen Betriebsarten Heizen mit 4.4, Kühlen mit 12.9 und Warmwassererzeugung mit 3.5 auf. Es ist nur ein geringer Zusatzaufwand in der Anlagenerstellung notwendig, um bei einer Sole/Wasser-Heizwärmepumpe die Kühlfunktion zu ergänzen. Relativ hohe Nutzungsgrade für aktiven Wärmepumpenbetrieb erreicht ein VRF-Multi-Split-Luft/Luft-Klimagerät mit 3.7 im Heizbetrieb und 4.1 für aktiven Kühlbetrieb, wobei bei der Wärmeabgabe im Raum über Konvektoren Geräuschen und Zugluft-Erscheinungen besondere Beachtung zu schenken ist. Alle Systeme erreichen eine gute thermische Behaglichkeit.

Die Lösung mit der höchsten Effizienz, ein erdgekoppeltes Wärmepumpensystem mit passiver Kühlfunktion, wurde in zwei Feldmessungen evaluiert. Es zeigte für ein MINERGIE®-Einfamilienhaus seine Leistungsfähigkeit und Praxistauglichkeit mit einer guten thermischen Behaglichkeit und hohen Effizienz. Zusammengefasst für alle Betriebsarten ergab sich beim MINERGIE®-Einfamilienhaus ein Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad von 3.7, und beim MINERGIE-P®-Mehrfamilienhaus ein Gesamtnutzungsgrad von 3.9.

Zwei Modelle zur Berechnung des Einflusses der passiven Kühlung auf den Heiz- und Warmwasserbetrieb mit erdgekoppelten Wärmepumpen zeigen nur geringe Unsicherheiten bei der Berechnung der Erdwärmesondenaustrittstemperatur. Sie liegen in Perioden intensiver Kühlnutzung unter 0.4 K und über die gesamte Kühlperiode unter 0.2 K. Das Modell 2 – adiabater Kurzzeit-Wärmespeicher – zeigt auch bei einer auf einen Tag begrenzten Berücksichtigung der Wärmespeicherung im Erdreich und unter Vernachlässigung der saisonalen Speichereffekte eine gute Übereinstimmung mit der detaillierten Simulation für die Anwendung an Einzelsonden.

Abstract

The SEK project intends to point out how to increase the summer thermal comfort in residential buildings with heat pumps in an energy-efficient way. An advantage is that heat pumps can, besides space heating and domestic hot water, provide space cooling too. Increased heat loads and increasing thermal comfort demands in summer can cause a cooling demand even in residential buildings. However, due to focussing on energy efficiency the priority still is an effective reduction of heat loads with good thermal insulation and effective shading.

In a theoretical comparison, three heat pump concepts were analyzed and evaluated including a multi split heat pump air-conditioner (air/air unit with variable refrigerant flow (VRF)), an air/water- and a brine/water heat pump system. The geothermal system reaches the highest efficiency with a generator seasonal performance factor over all modes of 4.7, for heating with 4.4, for cooling with 12.9 and for domestic hot water generation with 3.5. Only a small additional investment is necessary to add a passive cooling to brine/water-heat pump. A VRF multi split air/air-conditioning unit achieved comparable high efficiency for active heat pump operation with 3.7 for heating and 4.1 for cooling operation. But with convectors as

heat supply system in the room, special attention has to be paid to draft and noise phenomena. All systems achieve a good thermal comfort.

The solution with the highest efficiency, the ground source heat pump system with a passive cooling mode, has been evaluated in two field measurements. This system showed a high efficiency and suitability for daily use with a good thermal comfort for a low-energy house with an overall seasonal performance of 3.7 as well as for a low-energy apartment building with an overall seasonal performance of 3.9.

Two models to calculate the influence of the passive space cooling on the space heating and domestic hot water generation with ground coupled heat pumps achieve low inaccuracies for the borehole outlet temperature in periods of intense space cooling usage with an accuracy of better than 0.4 K and over the entire cooling period better than 0.2 K. Model 2 – short time adiabatic heat storage – shows even with a restricted considered heat storage in the ground only for one day and the disregard of seasonal storage effects a good consistency with the detailed simulation for the application on single boreholes.

Résumé

Le projet SEK vise à montrer avec quels systèmes de pompe à chaleur le confort thermique estival peut être augmenté à haute efficacité énergétique dans des bâtiments résidentiels. L'avantage ici est que, la pompe à chaleur peut en plus de chauffage et de l'eau chaude sanitaire aussi produire du froid pour la climatisation. Une augmentation des gains de chaleur interne et une demande augmentée de confort en été peut aussi dans les bâtiments résidentiels provoquer une demande de refroidissement. Toutefois, la priorité est toujours une réduction efficace des gains de chaleur avec une bonne isolation thermique et protection solaire.

Trois concepts des pompes à chaleur ont été analysés et évalués dans une comparaison théorique comprenant une pompe à chaleur DRV multi split réversible Inverter, une pompe à chaleur air/eau et une pompe à chaleur géothermique. Le système géothermique atteint la plus haute efficacité dans tous les modes de 4.7, pour le chauffage de 4.4, pour le refroidissement de 12.9 et pour l'eau chaude sanitaire avec 3.5. Seulement un petit investissement supplémentaire est nécessaire pour ajouter un refroidissement passif avec sonde géothermique. Une pompe à chaleur DRV multi split réversible Inverter à haut rendement atteint une efficacité élevée pour le fonctionnement pompe à chaleur active avec 3,7 pour le chauffage et de 4,1 pour l'opération de refroidissement. Avec convecteurs comme systèmes de dissipation de chaleur, une attention particulière devait être prêtée au courant d'air et aux phénomènes de bruit. Tous les systèmes atteignent un bon confort thermique.

La solution avec la plus grande efficacité, une pompe à chaleur géothermique avec un système de refroidissement passif, a été évaluée dans deux mesures in-situ. Ce système a montré son efficacité et son utilité avec un bon confort thermique et une haute efficacité pour une maison individuelle à basse consommation énergétique avec une efficacité du générateur de chaleur saisonnière de 3.7 et pour un immeuble d'appartements à consommation énergétique très faible avec 3.9.

Deux modèles pour calculer l'influence du refroidissement passif sur le chauffage et la préparation de l'eau chaude sanitaire avec une pompe à chaleur géothermique atteint une bonne précision pour la température à la sortie de la sonde géothermique. Elle est dans les périodes d'utilisation de la chaleur intense en dessous de 0.4 K et sur toute la période de refroidissement en dessous de 0.2 K. Le Modèle 2 – stockage thermique adiabatique à court terme – montre, même avec un stockage de la chaleur dans le sol limitée à un jour et en ignorant les effets d'accumulation saisonnière, une bonne cohérence avec la simulation détaillée pour des sondes individuelles.

1. Grundlagen und Vorgehen

1.1. Motivation für die Durchführung des Projekts

Im Winter haben sich die Behaglichkeitsbedingungen in Niedrigenergiebauten durch eine gut gedämmte Gebäudehülle, Fenster mit tiefen U-Werten und einer Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung wesentlich verbessert. Dazu beigetragen hat auch der Schweizer Minergie®-Standard [1], der den Energieverbrauch reduziert und die Behaglichkeit gesteigert hat. Mit den Fortschritten im Winter steigt allerdings auch der Anspruch im Sommer.

Die sommerliche Kühlung von Gebäuden, auch Wohngebäuden, gewinnt zunehmend an Bedeutung. Hauptgründe sind höhere innere thermische Lasten in Verbindung mit modernen Bauweisen, die einen zunehmenden Anteil an transparenten Flächen aufweisen, bis hin zu den populären Glasfassaden. Hinzu kommt der gestiegene Lebensstandard mit hohen Ansprüchen an die thermische Behaglichkeit. Die Minimierung des zusätzlichen Energiebedarfs bei der Kühlung ist eine Herausforderung für energieeffiziente Gebäude.

Eine effiziente Bereitstellung für behagliches Wohnen ist der Kernpunkt der notwendigen Aktivitäten. Dabei gilt es, zuerst die entstehenden thermischen Lasten zu minimieren, beispielsweise durch eine Verschattung zum Schutz vor zu starker solarer Einstrahlung oder eine Reduktion der Abwärme elektrischer Geräte durch effiziente Technik zum Vermeiden von unnötigen Stand-By-Verlusten. Der verbleibende Kühlbedarf sollte dann mit möglichst geringem Aufwand gedeckt werden. Systeme, mit denen sowohl geheizt als auch gekühlt werden kann, versprechen einen geringen Investitionsbedarf und können mit einer entsprechenden Regelung eine sehr gute Effizienz erreichen.

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.

Die Menschen in Europa verbringen einen grossen Teil ihrer Zeit im Gebäude. Die menschliche Leistungsfähigkeit und das Wohlbefinden stehen in engem Zusammenhang mit äusseren Einflüssen, zu denen im Wesentlichen Licht, Schall, Gerüche, stoffliche Emissionen, Wärme und Feuchte zählen. Diese Faktoren beeinflussen den Menschen, werden im Gegenzug aber auch selbst von ihm beeinflusst.

Das Hauptkriterium für die thermische Behaglichkeit ist die operative Raumtemperatur, in der die konvektive Lufttemperatur des Raums und die sich aus den Innenflächen ergebende Strahlungstemperatur gleich gewichtet zusammengefasst werden. Im Winter wird eine Temperatur zwischen 20 °C und 23 °C als notwendig erachtet. Die Wärmeerzeugung sollte mit einem möglichst grossen Anteil erneuerbarer Energie erfolgen, z.B. durch Nutzung von Biomasse oder Umweltwärme mit Wärmepumpen.

Eine Kühlung von Räumen ist nur in bestimmten Fällen, z.B. bei hohen inneren Wärmelasten, unabdingbar. Oft wird eine operative Temperatur von 26.5 °C als oberer Grenzwert angestrebt. Die hier betrachteten Systeme sind jedoch nicht dazu gedacht, eine maximale Temperatur genau einzuhalten, wie dies bei Klimaanlage der Fall ist. Vielmehr sollen sie mit einer ergänzenden Kühlfunktion die thermische Behaglichkeit im Sommer verbessern und dabei eine gegebenenfalls begrenzte Wirkung in Kauf nehmen, die durch die Limitierung natürlicher Kältequellen bedingt sein kann. Dies ist beispielsweise der Fall im Wohnbereich, wo der Fokus nicht auf einer strikten Einhaltung einer oberen Temperaturgrenze liegt, sondern darauf, Temperaturspitzen zu vermeiden, das Temperaturniveau insgesamt leicht zu senken und Handlungsspielraum in der Nutzung zu schaffen. Dabei ist eine zentrale Anforderung, dass nur ein geringer zusätzlicher Energieaufwand für die Kühlung akzeptiert wird.

1.2. Zielsetzung und Lösungsweg

Dieses Projekt will Beiträge leisten zur Förderung einer energieeffizienten sommerlichen thermischen Behaglichkeit. Dazu wurden folgende Schritten angegangen:

- **Literatur- und Marktrecherche** zur Charakterisierung des Standes der Technik
- **Bewertung der gefundenen Systeme und Definieren von Standardsystemen** zum Heizen und Kühlen für unterschiedliche Anwendungsbereiche (z.B. Minergie®, Minergie-P®)
- **Berechnung und Optimierung der Systemkonfigurationen und der Regelstrategien**
- **Feldtest eines Standardsystems** zur Beurteilung des realen Verhalten
- **Umsetzen der Ergebnisse in Richtlinien und Tools** für die Systemauslegung

Basierend auf der Marktbeobachtung wurde während dem Projekt fortlaufend der Stand und die Entwicklung von Wärmepumpen-Aggregaten zum Heizen und Kühlen von Wohngebäuden beobachtet. Aus der Vielfalt der technischen Möglichkeiten wurden sinnvolle Systemkonfigurationen ausgewählt. Diese Systeme wurden anhand eines theoretischen Referenzgebäudes in Simulationen detailliert untersucht und gegenübergestellt. Das Referenzgebäude ist im Anhang: Annahmen und Randbedingungen dokumentiert. Alle für die Raumtemperaturdynamik relevanten Bauteile des Gebäudes inklusive der technischen Anlage sind in der Simulation abgebildet. Einzig die Erdwärmesonde bildet eine Ausnahme, da in der dynamischen Simulation ein stark vereinfachtes Modell verwendet wird. Anschliessend wurden die Last- und Temperaturverläufe der Erdwärmesonde aus der Gebäude- und Anlagensimulation mit einer separaten, detaillierten Simulation der Erdwärmesonde verifiziert und gegebenenfalls die Gebäude- und Anlagensimulation angepasst. Die Ergebnisse der Simulationen sind in Kapitel 3 detailliert dargestellt.

Während der Projektlaufzeit konnten zwei Feldmessungen durchgeführt werden. Eine Feldmessung wurde im Rahmen dieses Projektes an einem Einfamilienhaus in Muolen (SG) durchgeführt, um neben den theoretischen Untersuchungen auch praktische Erfahrungen sammeln zu können. Die Ergebnisse der Feldmessung Muolen sind in einem separaten Bericht dokumentiert [2]. Parallel zu diesem Projekt konnte an einem Mehrfamilienhaus in Basel eine Feldmessung ebenso mit dem Focus auf der passiven Kühlfunktion durchgeführt werden. Die Ergebnisse und Erfahrungen aus diesem separaten Projekt wurden in diesem Projekt berücksichtigt. Detailliert sind die Ergebnisse der Feldmessung CosyPlace in Basel in [3] dokumentiert. In Kapitel 1.5 werden als Kurz-Information Zusammenfassungen beider Berichte aufgeführt.

1.3. Marktsituation

Das Themenfeld Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen in Wohnbauten wurde in den letzten Jahren aktiv von der Industrie unterstützt, indem laufend Geräte mit verschiedenen Kühloptionen auf den Markt kommen (z.B. [4]). Von Seiten der klassischen Klimagerätehersteller werden Luft/Wasser - Splitgeräte angeboten, die Heizen entweder als Zusatzoption mit anbieten oder mit dem Schwerpunkt Heizen angeboten werden (z.B. [5]). Bei den klassischen Heizwärmepumpen mit Kühlfunktion sind insbesondere bei erdgekoppelten Wärmepumpen oftmals passive Kühlfunktionen integriert. Die Modelle aus dem Klimagerätebereich sind meist Luft/Wasser-Geräte die nur eine aktive Kühlfunktion anbieten. Eine weitere technische Lösung zur Kühlung stellt ein Zusatzmodul für eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung dar, wobei eine integrierte Wärmepumpe die Zuluft abkühlt und die Wärme über die Fortluft abführt (z.B. [6]). Diese Lösung kann, mit dem auf den hygienischen Lüftungsbedarf begrenzten Luftvolumenstrom, jedoch nur eine geringe Wärmeleistung bereitstellen.

Über die aktuelle Entwicklung in der Praxis erfolgt im Projekt ein kontinuierlicher Austausch mit dem Industriepartner und einem auf dem Gebiet tätigen Planungsbüro. Von dem Planungsbüro wird seit etwa 2005 eine Nachfrage nach Kühloptionen festgestellt. Diese wird teilweise durch das Angebot im Markt ausgelöst, jedoch von den Kunden offen aufgenommen. Häufig fällt der Entscheid zwischen einer Erdwärmesonde oder Aussenluft als Wärmequelle mit Hilfe der Kühloption zugunsten der Erdwärmesonde, ohne Kühloption würde eher Aussenluft als Wärmequelle realisiert. Besondere Beachtung erfordern gemäss dem Gespräch zurzeit einerseits die Temperaturen im Fussboden aus Gründen der Behaglichkeit und einer möglichen Taupunktunterschreitung und andererseits die Reglerkonfiguration bei einer automatischen Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb. Hinsichtlich Aktivierung und Umfang der Kühlung gibt es keine eindeutige Präferenz für oder gegen eine automatische Umschaltung. Einerseits wird eine ganzjährige Behaglichkeitssteigerung mit einer Komfort – Kühlfunktion begrüsst, andererseits besteht der Wunsch diese Funktion nach Bedarf des Benutzers zeitlich und gegebenenfalls auch örtlich begrenzt manuell zu aktivieren oder zu deaktivieren. Für die Betrachtungen kann davon ausgegangen werden, dass eine mechanische Lüftungsanlage in Neubauten im Normalfall vorhanden ist. Eine Kühlung mit einer Nachtlüftung wird in der Praxis als nur sehr bedingt nutzbar angesehen. Die erwähnten Gründe dafür liegen in der durch geringe Volumenströme begrenzten Kühlleistung bzw. bei erhöhten Volumenströmen durch Schall - Anforderungen steigenden Aufwendungen für grössere Leitungsquerschnitte. Typischerweise gekühlte Räume sind Schlafzimmer, Wohnräume, Attikageschosse bzw. obere Stockwerke. Neben den technischen Aspekten liegt eine zentrale Herausforderung in der Praxis im Zusammenbringen und Zusammenarbeiten der Gewerke Haustechnik-Planer, Geräte-Lieferant, Bauunternehmer, Elektro-Planer und Elektro-Installateur damit eine sowohl hinsichtlich erreichter Behaglichkeit als auch Effizienz zufriedenstellende Lösung realisiert werden kann.

1.4. Auswertemethodik und Gütekriterien

Die Analyse und Bewertung der Wärmepumpensysteme zum Heizen und Kühlen erfolgt hinsichtlich der Grössen Effizienz, gesamter Endenergieaufwand, Behaglichkeit, Investitionskosten und Systemkomplexität. Die Bewertungen der beiden wichtigsten Kenngrössen, Energie und thermische Behaglichkeit, werden in diesem Unterkapitel detailliert erläutert. Die gewünschte thermische Behaglichkeit im Raum definiert dabei den Bedarf, der mit einer Zufuhr oder Abfuhr von Wärme mit möglichst geringem Aufwand erreicht werden soll. Auf dieser Definition der Bedürfnisse basiert dann die Konfiguration und Auslegung des Systems, welches in der Simulation abgebildet oder in der Feldmessung beobachtet wird. Als Ergebnis stellen sich der Energiebedarf und die thermische Behaglichkeit ein.

1.4.1. Energetische Bewertung

Die folgende Grafik (Abb. 1) zeigt die verwendeten Definitionen der Effizienz-Kennzahlen und die zugehörigen Bilanzgrenzen für die Bewertung einer Wärmeversorgung mit Wärmepumpenanlagen. In dieser Untersuchung werden nur die in schwarzer Schrift dargestellten Komponenten betrachtet. Die hellgrau dargestellten Elemente zeigen die Einordnung in die Bilanzgrenzen, werden jedoch in diesem Projekt nicht betrachtet.

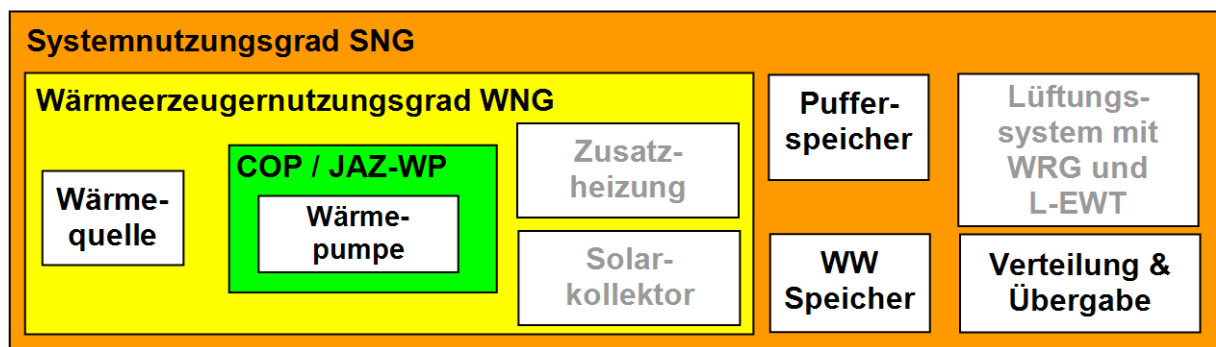


Abb. 1: Effizienz-Kennzahlen und Bilanzgrenzen für die energetische Bewertung von Wärmepumpensystemen

Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad WNG

(äquivalent zum Wirkungsgrad eines Gas- oder Ölkessels):

Der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad ist das Verhältnis der von allen Wärmeerzeugern erzeugten Wärme zu dem dafür erforderlichen Energieaufwand in den Wärmeerzeugern über eine definierte Zeitperiode, wobei der Aufwand sowohl während den Betriebszeiten als auch während dem Stand-By enthalten sind.

Gl. 1 bis Gl. 3 zeigen die Berechnung des Wärmeerzeuger-Nutzungsgrades aus den zugehörigen Wärmemengen und elektrischen Energien für die einzelnen Betriebsmodi Raumheizung, Warmwasserbereitung und Raumkühlung.

In Gl. 4 ist die Berechnung des Gesamt-Wärmeerzeuger-Nutzungsgrades über alle drei Betriebsmodi gemeinsam aufgeführt, wobei die Berechnung dargestellt ist für die Ausgangsgrössen:

- Wärmemengen und elektrische Energien je Betriebsmodus
- Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad und elektrische Energien je Betriebsmodus
- Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad und Wärmemengen je Betriebsmodus

Ein Rechenbeispiel befindet sich in Anhang: Rechenbeispiel Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad

$$WNG_H = \frac{Q_{H,gen}}{E_{H,gen}} \quad \text{Gl. 1}$$

$$WNG_W = \frac{Q_{W,gen}}{E_{W,gen}} \quad \text{Gl. 2}$$

$$WNG_C = \frac{Q_{C,gen}}{E_{C,gen}} \quad \text{Gl. 3}$$

$$\begin{aligned} WNG_{HWC} &= \frac{Q_{HWC,gen}}{E_{HWC,gen}} = \frac{Q_{H,gen} + Q_{W,gen} + Q_{C,gen}}{E_{H,gen} + E_{W,gen} + E_{C,gen}} \\ &= WNG_H * \frac{E_{H,gen}}{E_{HWC,gen}} + WNG_W * \frac{E_{W,gen}}{E_{HWC,gen}} + WNG_C * \frac{E_{C,gen}}{E_{HWC,gen}} \end{aligned} \quad \text{Gl. 4}$$

$$= \frac{Q_{HWC,gen}}{\frac{Q_{H,gen}}{WNG_H} + \frac{Q_{W,gen}}{WNG_W} + \frac{Q_{C,gen}}{WNG_C}}$$

Nomenklatur:

WNG_{HWC}	Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad für die Funktionen Raumheizung (H), Warmwasserbereitung (W) und Raumkühlung (C)
WNG_H	Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad für die Funktion Raumheizung
WNG_W	Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad für die Funktion Warmwasserbereitung
WNG_C	Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad für die Funktion Raumkühlung
$Q_{HWC,gen}$	erzeugte Wärme aller Wärmeerzeuger für die Funktionen Raumheizung, Warmwasserbereitung und Raumkühlung
$Q_{H,gen}$	erzeugte Wärme aller Wärmeerzeuger für Raumheizung
$Q_{W,gen}$	erzeugte Wärme aller Wärmeerzeuger für Warmwasserbereitung
$Q_{C,gen}$	abgeführte Wärme aller Kälteerzeuger für Raumkühlung
$E_{HWC,gen}$	elektrischer Aufwand aller Wärmeerzeuger für die Funktionen Raumheizung (H), Warmwasserbereitung (W) und Raumkühlung (C); enthält den elektrischen Aufwand während dem aktiven Betrieb und den Aufwand im Stand-By
$E_{H,gen}$	elektrischer Aufwand zur Erzeugung der Wärme zur Raumheizung $Q_{H,gen}$; enthält den elektrischen Aufwand während dem Heizbetrieb und der dem Heizbetrieb zugeordnete Aufwand im Stand-By $E_{H,gen} = E_{H,compressor} + E_{H,control+auxillaries} + E_{H,Pump / Fan,source}$
$E_{W,gen}$	elektrischer Aufwand zur Erzeugung der Wärme für Warmwasser $Q_{W,gen}$; enthält den elektrischen Aufwand während dem Warmwasserbetrieb und der dem Warmwasserbetrieb zugeordnete Aufwand im Stand-By $E_{W,gen} = E_{W,compressor} + E_{W,control+auxillaries} + E_{W,Pump / Fan,source}$
$E_{C,gen}$	elektrischer Aufwand zur Abfuhr der Wärme zur Raumkühlung $Q_{C,gen}$; enthält den elektrischen Aufwand während dem Kühlbetrieb und der dem Kühlbetrieb zugeordnete Aufwand im Stand-By $E_{C,gen} = E_{C,compressor} + E_{C,control+auxillaries} + E_{C,Pump / Fan,source}$

System-Nutzungsgrad SNG

Der System-Nutzungsgrad ist das Verhältnis der Nutzwärme für Raumheizung, Warmwasser und Raumkühlung zum gesamten Energieaufwand für alle Komponenten (Wärmequelle, Wärmeerzeugung, Wärmespeicherung, Wärmeverteilung, Wärmeübergabe und Wärmerückgewinnung) über eine definierte Zeitperiode, wobei der Aufwand sowohl während den Betriebszeiten als auch während dem Stand-By enthalten sind. Die Lüftungsanlage inklusive WRG ist wegen der Konzentration auf die Wärme- / Kälteerzeugung aus der Betrachtung ausgenommen. Gl. 5 bis Gl. 7 zeigen die Berechnung des System-Nutzungsgrades aus den zugehörigen Wärmemengen und elektrischen Energien für die einzelnen Betriebsmodi Raumheizung, Warmwasserbereitung und Raumkühlung. In Gl. 8 ist die Berechnung des gesamten System-Nutzungsgrades über alle drei Betriebsmodi aus den Wärmemengen und elektrischen Energien aufgeführt. Die Berechnung aus den Einzel-System-Nutzungsgraden erfolgt analog zur Berechnung des Wärmeerzeuger-Nutzungsgrades in Gl. 4.

$$SNG_H = \frac{Q_{H,u}}{E_{H,sys}} \quad \text{Gl. 5}$$

$$SNG_W = \frac{Q_{W,u}}{E_{W,sys}} \quad \text{Gl. 6}$$

$$SNG_C = \frac{Q_{C,u}}{E_{C,sys}} \quad \text{Gl. 7}$$

$$SNG_{HWC} = \frac{Q_{HWC,u}}{E_{HWC,sys}} = \frac{Q_{H,u} + Q_{W,u} + Q_{C,u}}{E_{H,sys} + E_{W,sys} + E_{C,sys}} \quad \text{Gl. 8}$$

Nomenklatur:

SNG_{HWC}	System-Nutzungsgrad für die Funktionen Raumheizung (H), Warmwasserbereitung (W) und Raumkühlung (C)
SNG_H	System -Nutzungsgrad für die Funktion Raumheizung
SNG_W	System -Nutzungsgrad für die Funktion Warmwasserbereitung
SNG_C	System -Nutzungsgrad für die Funktion Raumkühlung
$Q_{HWC,u}$	Nutzwärme für die Funktionen Raumheizung, Warmwasserbereitung und Raumkühlung
$Q_{H,u}$	Nutzwärme für Raumheizung
$Q_{W,u}$	Nutzwärme für Warmwasserbereitung
$Q_{C,u}$	Nutzwärme für Raumkühlung
$E_{HWC,sys}$	elektrischer Aufwand des gesamten Systems zur Bereitstellung der Nutzwärme für die Funktionen Raumheizung (H), Warmwasserbereitung (W) und Raumkühlung (C); enthält den elektrischen Aufwand während dem aktiven Betrieb und den Aufwand im Stand-By
$E_{H, sys}$	elektrischer Aufwand des gesamten Systems zur Bereitstellung der Nutzwärme für Raumheizung $Q_{H,u}$; enthält den elektrischen Aufwand während dem Heizbetrieb und den anteilig zugeordneten Aufwand im Stand-By
$E_{W, sys}$	elektrischer Aufwand des gesamten Systems zur Bereitstellung der Nutzwärme für Warmwasser $Q_{W,gen}$; enthält den elektrischen Aufwand während dem Warmwasserbetrieb und den anteilig zugeordneten Aufwand im Stand-By
$E_{C, sys}$	elektrischer Aufwand des gesamten Systems zur Bereitstellung der Nutzwärme zur Raumkühlung $Q_{C,gen}$; enthält den elektrischen Aufwand während dem Kühlbetrieb und den anteilig zugeordneten Aufwand im Stand-By

1.4.2. Behaglichkeitsbewertung

Globale thermische Behaglichkeit

Die Bewertung der erreichten Behaglichkeit erfolgt gemäss SN EN 15251 [7]. Diese verwendet eine Einteilung in Qualitäts-Kategorien anhand des erwarteten Anteils unzufriedener Personen (PPD) bei den jeweiligen thermischen Behaglichkeits-Bedingungen. Zur Bewertung herangezogen wird für diese Betrachtung alleine die in der Simulation bestimmte operative Raumtemperatur. Diese wird berechnet als arithmetisches Mittel aus der Raumluft-Temperatur und der mittleren Strahlungstemperatur der umgebenden Oberflächen, analog zu SIA 382/1 [8]. Auf eine Berücksichtigung der relativen Luftfeuchte wird verzichtet, da diese von keinem System zielgerichtet beeinflusst wird. Tab. 1 zeigt die Kategorien für die Bewertung des Innenraumklimas gemäss SN EN 15251 für Wohnräume mit dem jeweils zugehörigen operativen Temperaturbereich.

Kategorie	PPD	Temperaturbereich Winter ($\approx 1.0\text{clo}$)	Temperaturbereich Sommer ($\approx 0.5\text{clo}$)
I	< 6%	21.0 °C - 25.0 °C	23.5 °C - 25.5 °C
II	< 10%	20.0 °C - 25.0 °C	23.0 °C - 26.0 °C
III	< 15%	18.0 °C - 25.0 °C	22.0 °C - 27.0 °C
IV	> 15%	< 18.0 °C oder > 25.0 °C	< 22.0 °C oder > 27.0 °C

Tab. 1: Temperaturbereiche für die Bewertung des Innenraumklimas gemäss SN EN 15251 für Wohnräume bei angenommener sitzender Aktivität ($\approx 1.2\text{ met}$) und 50% relativer Luftfeuchte

Die Qualitätsbewertung des thermischen Raumklimas erfolgt als zeitlich prozentuale Häufigkeit der operativen Raumtemperatur in den Kategorien I (beste) bis IV (schlechteste) gemäss Tab. 1. Dabei wird zonenweise jeweils für die Winterperiode und die Sommerperiode die Stundenhäufigkeit in den Kategorien aufsummiert und durch die Gesamtzahl der Stunden dividiert. Die Winterperiode wird aufgrund der gewählten Klimabedingungen für den Standort Basel-Binningen definiert als der Zeitraum vom 01. Oktober bis zum 14. Mai, die Sommerperiode als Zeitraum vom 15. Mai bis zum 30. September. In der Auswertung enthalten sind alle Stunden der jeweiligen Periode, sowohl diejenigen mit aktivem Heiz-/Kühlsystem als auch diejenigen mit inaktivem Heiz-/Kühlsystem. Die Auswertungen und Diagramme zeigen die so bestimmte prozentuale Häufigkeit, wobei der Anteil, welcher schon einer besseren Kategorie zugeordnet ist, in der nächst schlechteren Kategorie abgezogen wird und so die Summe aller Kategorien je System 100% ergibt.

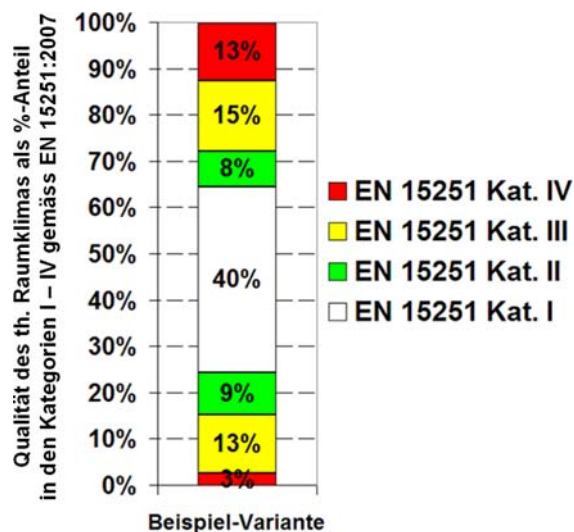


Abb. 2: Beispiel für die Qualitätsbewertung des thermischen Raumklimas als zeitlich prozentualer Anteil der Kühlperiode (15. Mai – 30. Sep.) in den Kategorien I – IV gemäss EN 15251:2007

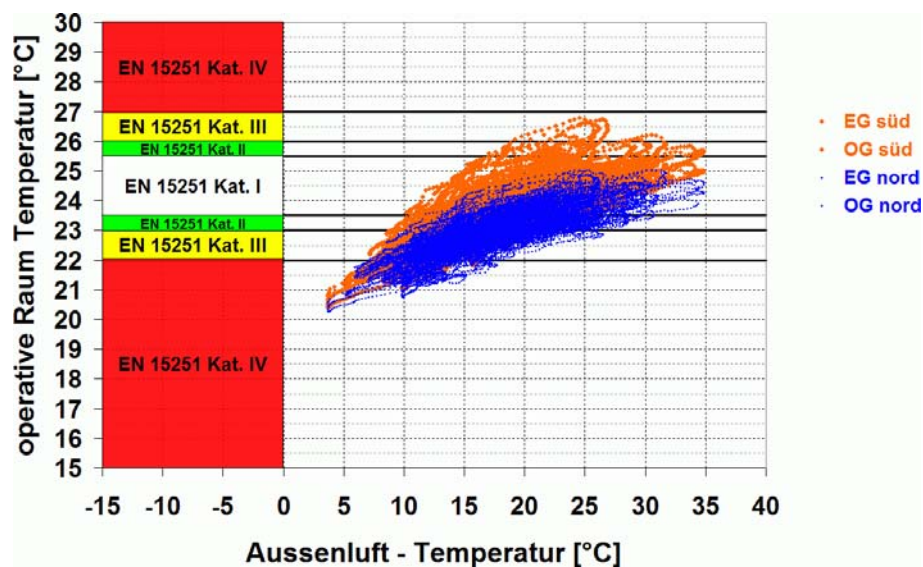


Abb. 3: Beispiel für die Qualitätsbewertung des thermischen Raumklimas

Ergänzend zu der quantitativen Auswertung des thermischen Raumklimas werden in Einzelfällen qualitative Darstellungen mit Streudiagrammen verwendet. Diese charakterisieren den Zusammenhang zwischen der operativen Raumtemperatur auf der Ordinatenachse und der Aussenluft-Temperatur auf der Abszissenachse. Am Rand sind zur Information die Behaglichkeitsbereiche aufgeführt.

Lokale thermische Behaglichkeit

Ein weiteres, relevantes Kriterium für die Bestimmung der Behaglichkeit bei der Kühlung mit dem Fussboden ist die einzuhaltende Oberflächentemperatur des Fussbodens. Die Norm SN EN ISO 7730:2006 [9] gibt einen Zusammenhang zwischen dem prozentualen Anteil unzufriedener Personen mit beschuhten Füßen durch warme oder kalte Fussbodenoberflächen und der Oberflächentemperatur des Fussbodens gemäss Abb. 4 an.

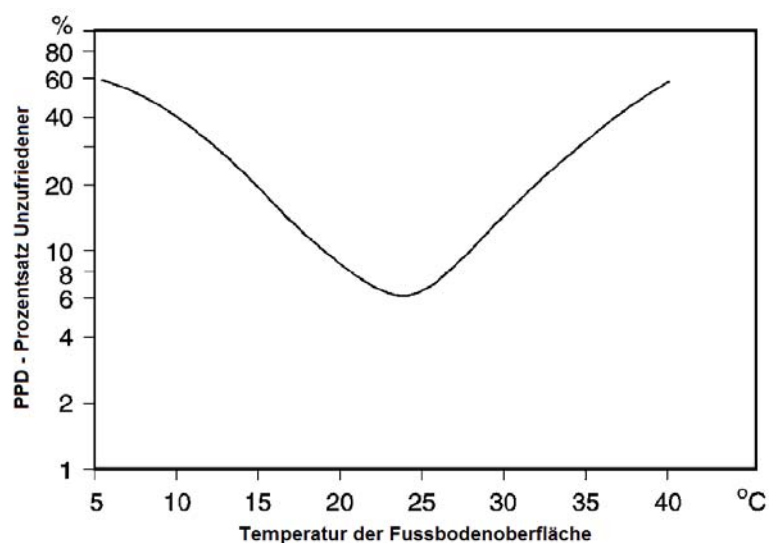


Abb. 4: lokale Unbehaglichkeit durch warme oder kalte Oberflächentemperaturen des Fussbodens für beschuhte Füße gemäss SN EN ISO 7730

Neben der Beschreibung in Abb. 4 lassen sich ergänzend Hinweise auf das Temperaturempfinden von nackten Füßen abhängig vom Oberflächenmaterial finden (siehe [10]), die in Tab. 2 zusammengefasst sind.

behagliche Fussboden Oberflächentemperaturen			
		min	max
beschuht		19 °C	29 °C
barfuss	Teppich	21 °C	28 °C
	Kiefernholz	23 °C	28 °C
	Eichenholz	24 °C	28 °C
	Linoleum	24 °C	28 °C
	Beton / Estrich	26 °C	28 °C

Tab. 2: Behagliche Fussboden-Oberflächentemperaturen

Lokale thermische Unbehaglichkeiten werden nicht detailliert ausgewiesen. Für die Kühlung mit der Fussbodenfläche wurde geprüft, dass die Oberflächen-Temperaturen zu jedem Zeitpunkt im behaglichen Bereich liegen.

Risiko der Kondensatbildung auf der gekühlten Fussbodenoberfläche

Bei der Kühlung eines Raumes mit der Fussbodenheizung kann bei Temperaturunterschreitung Kondensat aus der Raumluft-Feuchte anfallen. In [11] wurde ausgearbeitet, dass das Risiko einer Kondensatbildung auf einer gekühlten Fussbodenoberfläche bei mechanisch belüfteten Räumen gering ist, solange die Oberflächen-Temperaturen oberhalb von 20 °C und damit im Behaglichkeitsbereich gemäss Tab. 2 liegen. Dies beruht auf der Annahme einer mittleren Zunahme der Raumluft-Feuchte gegenüber der Aussenluft-Feuchte für mechanisch belüftete Wohnungen von $1.5 \text{ g}_{\text{Wasser}}/\text{kg}_{\text{tr.Luft}}$ gemäss [12], welche mit den Ergebnissen von [13] bestätigt werden kann. Das Risiko bei Wohnungen ohne mechanische Lüftung ist höher. In [12] und [13] wurden Zunahmen der Raumluft für nicht mechanisch belüftete Wohnungen im Bereich 1.5 bis $4 \text{ g}_{\text{Wasser}}/\text{kg}_{\text{tr.Luft}}$ gemessen. Für einen Raum ohne mechanische Lüftung muss das Kondensationsrisiko gesondert betrachtet und gegebenenfalls eine mögliche Taubildung überwacht werden.

1.5. Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Feldmessungen

1.5.1. Feldmessung Muolen

In Muolen wurde 2008 das Minergie®- Haus mit der Zertifikatsnummer SG-668 erstellt. Das Einfamilienhaus wird mit einer Sole/Wasser Wärmepumpe vom Typ Viessmann Vitocal 300-G monovalent beheizt und bei Bedarf mit der Erdwärmesonde passiv gekühlt. Die Wärmeabgabe im Heizbetrieb und die Wärmeaufnahme im Kühlbetrieb erfolgen über eine Niedertemperatur- Fussbodenheizung.

Im Rahmen dieses Projektes soll das Praxisverhalten von erdgekoppelten Wärmepumpen mit passiver Kühlung messtechnisch untersucht werden. Die Messungen wurden im Zeitraum von Januar 2009 bis April 2010 durchgeführt. Anhand der Messdaten der ersten Winterperiode konnte die Anlage optimiert werden, so dass die Messdaten ab der Sommer 2009 repräsentativ ausgewertet werden konnten. Um eine Winterperiode repräsentativ auszuwerten, wurde die Messperiode vom Dezember 2009 bis zum Frühling 2010 verlängert.

Im Berichtszeitraum wurden der Aufwand für die passive Kühlung und der Einfluss der Kühlung auf den Heiz- und Warmwasserbetrieb ermittelt. Ebenfalls wurden Kennzahlen als Gütekriterium ermittelt und die Energiebilanz der Anlage für die Messperioden erstellt. Der Systemnutzungsgrad für Heizung, Warmwasser und Kühlung, d.h. das Verhältnis zwischen Nutzenergie zu Aufwand, beträgt in diesem Zeitraum 3.7 sowie 7.1 nur für die passive Kühlung.

Das installierte passive Kühlsystem erweist sich somit als ein sehr effizientes System zur Gebäudekühlung. Das Ansteigen der Innentemperatur kann mit dem passiven Kühlsystem reduziert werden. Während zwei achttägigen Perioden mit gleicher Aussentemperatur, einmal mit und einmal ohne Kühlung, konnte eine Absenkung der über 24 h gemittelten mittleren Raumtemperatur durch das passive Kühlsystem um 3 K festgestellt werden.

1.5.2. Feldmessung CosyPlace

In Basel wurde 2007 das erste Mehrfamilienhaus nach Minergie-P®-Standard namens CosyPlace von der gribi theurillat AG erstellt. Im Winter versorgt eine erdgekoppelte Wärmepumpe eine Niedertemperatur-Fussbodenheizung. Im Sommer steigert eine erdgekoppelte, passive Kühlung über den Fussboden die thermische Behaglichkeit. Mit der messtechnischen Untersuchung sollen Erkenntnisse über das Praxisverhalten und den Benutzereinfluss gewonnen werden. Die Messungen konnten in der Periode von November 2007 bis September 2009 erfolgreich durchgeführt werden. Ein vorausgehendes Simulations-Projekt zeigte, dass die thermische Behaglichkeit durch den zusätzlichen passiven Kühlbetrieb mit geringem Zusatzaufwand wesentlich gesteigert werden kann. Die Auslegung von Fussbodenheizung und Erdwärmesonde erfolgen dabei für den Heizbetrieb.

Insgesamt wurde eine gute thermische Behaglichkeit erreicht, mit Raumtemperaturen mehrheitlich im Bereich 19 - 24 °C während den Winterperioden und 21 - 26 °C im Sommer. Die relative Raumluftfeuchte war mit 21 % r.F. bis 62 % r.F. im Winter zeitweise eher niedrig. Mit einem jährlichen Wärmeerzeugernutzungsgrad im Warmwasserbetrieb von 2.7, im Heizbetrieb von 4.3 und im passiven Kühlbetrieb bis 15.2 im Wochendurchschnitt wurde – dank Optimierungen aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse – ein effizienter Anlagenbetrieb realisiert. Die abgeführte Wärmemenge im Kühlbetrieb konnte von 7 MJ/m² im ersten auf 12 MJ/m² im zweiten Betriebsjahr gesteigert werden. Der Heizwärmebezug ist mit 103 MJ/m² im ersten und 111 MJ/m² im zweiten Winter absolut gesehen eher gering, jedoch deutlich höher als der rechnerische Minergie-P® Nachweiswert während der Planung.

2. Systemlösungen

2.1. Wie kann man mit Heizwärmepumpenanlagen kühlen?

Ein geringer zusätzlicher Energieaufwand für Kühlung verlangt nach einem geringen Kühlbedarf, der mit einem geringen Aufwand an Endenergie bereitgestellt werden kann. Das Verhältnis zwischen Kühlenergie und dem dafür notwendigen Endenergie-Aufwand, in der Regel Elektrizität, wird als Nutzungsgrad bezeichnet. Dieser ist umso höher je geringer die zur Bedarfsdeckung eingesetzte Energie ist.

Die Berechnung der Kühlenergie hat bisher noch einen geringen Stellenwert in Normung und Berechnungsverfahren. Somit liegen bisher im Allgemeinen keine Grenzwerte für die akzeptierte Kühlenergie vor, wie beispielsweise für den Heizwärme- oder Heizenergiebedarf. Im Bereich der Kühlung wird hauptsächlich die Leistung der Anlagen betrachtet. Im schweizerischen Normenwerk beispielsweise darf eine Kühlung zudem nur realisiert werden, wenn bauliche Anforderungen an die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle, Sonnenschutz und die Wärmespeicherfähigkeit der Raumumschliessungsflächen erfüllt sind [8]. Weiterhin muss der Bedarf einer Kühlung nachgewiesen werden, entweder durch besondere Anforderungen an die Raumtemperatur, hohe innere Wärmelasten oder hohe sommerliche Raumlufttemperaturen. Ohne diesen Nachweis dürfen gemäss MuKen Basismodul [14], bei Einhaltung der baulichen Anforderungen, nur Anlagen mit kleinem elektrischem Leistungsbedarf für Medienförderung und -aufbereitung inklusive Kühlung realisiert werden. Dieser kleine elektrische Leistungsbedarf wird für Neubauten mit 7 Watt pro Quadratmeter gekühlte Nettogeschossfläche festgelegt, für bestehende Anlagen und sanierte Anlagen mit 12 W/m².

Konkret bedeutet das beispielsweise für das verwendete Referenzgebäude mit 167 m² Nettogeschossfläche eine maximale elektrische Leistungsaufnahme der Raumkühlanlage von 1.17 kW. Das entspricht bei einer aktiven Klimaanlage gemäss System SEK1 L/L-WP oder SEK2 L/W-WP mit einem angenommenen System-Nutzungsgrad von 3 einer Kühlleistung von 3.51 kW für das ganze Gebäude. Ein System mit passiver Kühlung mit Erdwärmesonden bezieht für die gleiche Kühlleistung eine elektrische Leistung von nur etwa 0.2 kW.

2.2. Wie vorgehen für eine energieeffiziente Kühlung?

Es stellt sich die Frage, wie kann ein geringer Energieaufwand für die Kühlung realisiert werden? Dies soll anhand des folgenden, schrittweisen Vorgehens erläutert werden.

1. Wärmelasten des Gebäudes reduzieren

Der erste Schritt ist, die Wärmelasten des Gebäudes und damit den Raumkühlbedarf, zu minimieren. Hierzu tragen die Minimierung der internen und externen Wärmelasten bei. Die internen Wärmelasten können durch effiziente Geräte und reduzierte Betriebs- und Stand-By-Zeiten minimiert werden. Bei den externen Wärmelasten ist vor allem die Reduktion der solaren Einstrahlung durch eine Verschattung wichtig, wobei die Interaktion mit der Tageslichtnutzung bzw. künstlicher Beleuchtung zu berücksichtigen ist.

2. Kühlung mit der Nachtlüftung nutzen

Im zweiten Schritt sollen natürliche Kühlquellen, wie beispielsweise die Lüftung während der Nachtstunden, genutzt werden. Dies kann entweder über Fensteröffnung geschehen oder über einen erhöhten Luftwechsel der mechanischen Lüftung. Der Nutzen in Wohnbauten kennt allerdings auch einige Grenzen. Von Sicherheitsaspekten und Wettereinflüssen bei nächtlicher Fensteröffnung, über Geräusche und Leitungsdimensionierung bei mechanischer Lüftung bis hin zum vor allem in warmen Perioden begrenzten Temperaturpotenzial.

3. Passive Kühlung

Die erste Form einer mechanischen Kühlung sollte passive bzw. natürliche Kältequellen nutzen. Hierbei ist der Aufwand darauf beschränkt, die natürliche Kältequelle zu erschliessen und per Medium (z.B. Wasser) zur Nutzung im Raum zu transportieren, wie dies beim direkten Kühlen mit Erdsonden der Fall ist.

4. Aktive Kühlung mit Zusatznutzen

Systeme mit aktiver Kälteerzeugung (=Wärmeabfuhr) über eine Kältemaschine sollten die Abwärme nutzen, beispielsweise zur Warmwasserbereitung.

5. Aktive Kühlung durch reine Wärmeabfuhr

Sollten alle diese vorgenannten Massnahmen nicht ausreichen und die notwendige Behaglichkeit nicht erreicht werden, so bleibt als letzte Möglichkeit die aktive Kühlung mit reiner Wärmeabfuhr beispielsweise an die Aussenluft, wie es mit klassischen Klimageräten geschieht.

Für eine Kühlung mit geringem Zusatzaufwand eignen sich besonders Wärmepumpensysteme. Einerseits wird bei diesen Systemen immer eine externe, natürliche Wärmequelle erschlossen, die gegebenenfalls auch als Wärmesenke dienen kann. Andererseits sind der Wärmepumpenprozess und der Kälteanlagenprozess im Grunde die gleichen Prozesse, nur einmal mit Nutzung der warmen Seite, einmal mit Nutzung der kalten Seite, wodurch mit Umkehrung des Prozesses sowohl geheizt als auch gekühlt werden könnte.

Für die passive Kälteerzeugung, wie in Kapitel 2.2, Absatz 3 beschrieben, werden mit Wärmepumpen – Heizsystemen prinzipiell folgende natürliche Kältequellen erschlossen:

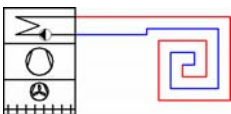
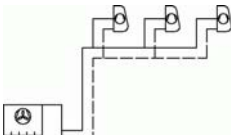
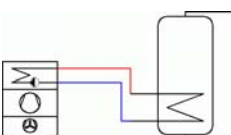
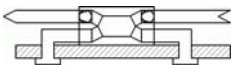
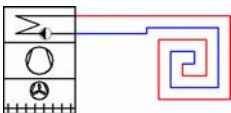
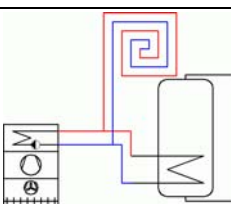
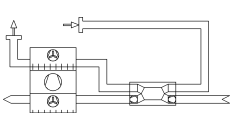
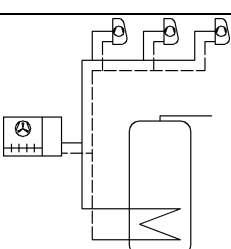
- Erdreich (Erdwärmesonden, Luft-Erdreich-Wärmetauscher, Erdwärmekollektoren)
- Grundwasser
- Aussenluft

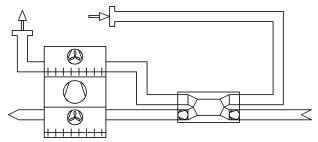
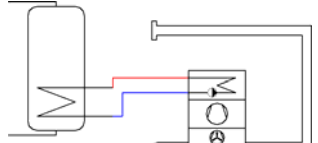
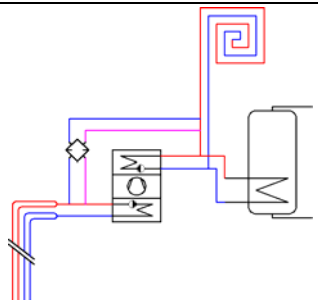
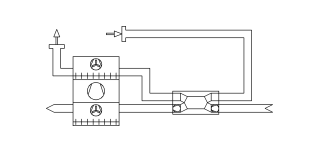
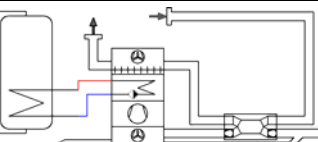
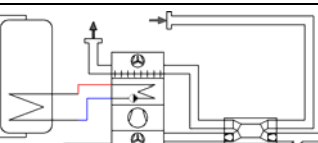
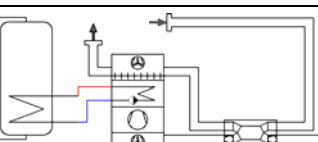
Wie oben unter Punkt 5 in 2.2 beschrieben kann die aktive Kälteerzeugung durch Prozessumkehr der Wärmepumpe erfolgen. Für die aktive Kühlung mit Zusatznutzen gemäss Punkt 4 stehen folgende Möglichkeiten offen:

- Abwärmenutzung (z.B. zur Wassererwärmung)
- Wärmespeicherung im Erdreich (Regeneration von Wärmequellen)

2.3. Welche technischen Schaltungen sind möglich?

Heizen und Warmwasserbereitung sind Standard-Anwendungen von Wärmepumpen in Wohngebäuden und insbesondere in Neubauten weit verbreitet. Im Umkehrbetrieb laufende Wärmepumpen sind als Klimageräte Standard-Anwendungen für Raumkühlung vorwiegend in Dienstleistungsbauten mit hohen internen Wärmelasten. Mit Wärmepumpensystemen kann besonders in Wohnbauten sehr günstig gekühlt werden, wenn die für die Wärmepumpe erschlossene Wärmequelle zur energieeffizienten, passiven Kühlung genutzt werden kann. Tab. 3 zeigt eine Zusammenstellung möglicher Funktions-Kombinationen, welche mit Wärmepumpensystemen in Wohngebäuden abgedeckt werden und dazu passende Systembeispiele.

Funktion	Beschreibung	Verbreitung	Beispiel
H	Heizwärmepumpe	Standardprodukt	
C	Klimagerät (split / multi-split)	Standardprodukt	
W	reine Warmwasser-Wärmepumpe oder Wärmepumpen-Boiler	Standardprodukt	
V	Wohnungslüftungsgerät	Standardprodukt	
HC	umkehrbare WP	Standardprodukt	
HW	Heiz- & Warmwasser WP	Standardprodukt	
HV	Lüftungsgerät mit WP	Standard für Minergie-P / Passivhaus	
CW	Wärmepumpen-Boiler mit dem auch gekühlt werden kann Klimagerät, welches auch zur Warmwasserbereitung dient	Nischenprodukt	

CV	Lüftungsgerät mit Kühl- funktion über eine Wärme- pumpe	Nischenprodukt für Minergie-P / Passivhaus	
WV	Abluft – WP für Warmwasser	Standardprodukt	
HCW	HW plus Umkehrbetrieb, Klimagerät mit Umkehrbetrieb plus W, HW plus pass. Kühlung	Marktwachstum	
HCV	Lüftungsgerät mit WP	Nischenprodukt für die Anwendung	
HWV	WP-Kompaktgerät	Standardprodukt für NEH	
CWV	Klimakompaktgerät	Nischenprodukt	
HCWV	Multifunktion Kompaktgerät	Markteinführung	

H - Heizung, C - Kühlung, W - Warmwasser, V - Lüftung

Tab. 3: Zusammenstellung möglicher Funktions-Kombinationen, welche mit Wärmepumpensystemen in Wohngebäuden abgedeckt werden und Systembeispiele

Aus den Vorbetrachtungen im Kapitel 2.2 können für die Anwendung auf Wohngebäude die vier wichtigsten Anwendungen zum energieeffizienten Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen, aufgeführt in Tab. 4, abgeleitet werden. Der Ausgangspunkt sind immer Heizsysteme mit Wärmepumpen. Diese werden dann auch zur Kühlung eingesetzt bzw. für die Kühlung ergänzt. Dabei werden die Funktionen Heizen, Kühlen, Warmwasserbereitung und Lüftung betrachtet.

Bezeichnung	Funktion	Kurz-Beschreibung	Kapitel
SEK 1	HC, W, V	Luft/Luft-Wärmepumpe	2.3.1
SEK 2	HCW, V	Luft/Wasser-Wärmepumpe	2.3.2
SEK 3	HCW, V	Sole/Wasser-Wärmepumpe	2.3.3
SEK 4	HCWV	Minergie-P / Passivhaus Kompaktgeräte	2.3.4

Tab. 4: Ausgewählte Systemkonfigurationen

2.3.1. Luft/Luft-Wärmepumpe

Die bisher standardmässig eingesetzten Geräte zur Raumkühlung sind Split-Klimageräte mit Konvektoren im Innenraum, der Wärmeverteilung über Kältemittelleitungen und einer Wärmeabfuhr an die Aussenluft. Dieses System zur Kühlung und Beheizung wird als Standardsystem SEK1 und Vergleichssystem mit rein aktiver Kühlung definiert. Die Funktionen Heizen und Kühlen übernimmt die Wärmepumpe. Die Lüftung wird von einem Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung (WRG) übernommen. Die Warmwasserbereitung erfolgt separat über einen der WRG nachgeschalteten Abluft-Wärmepumpen-Boiler.

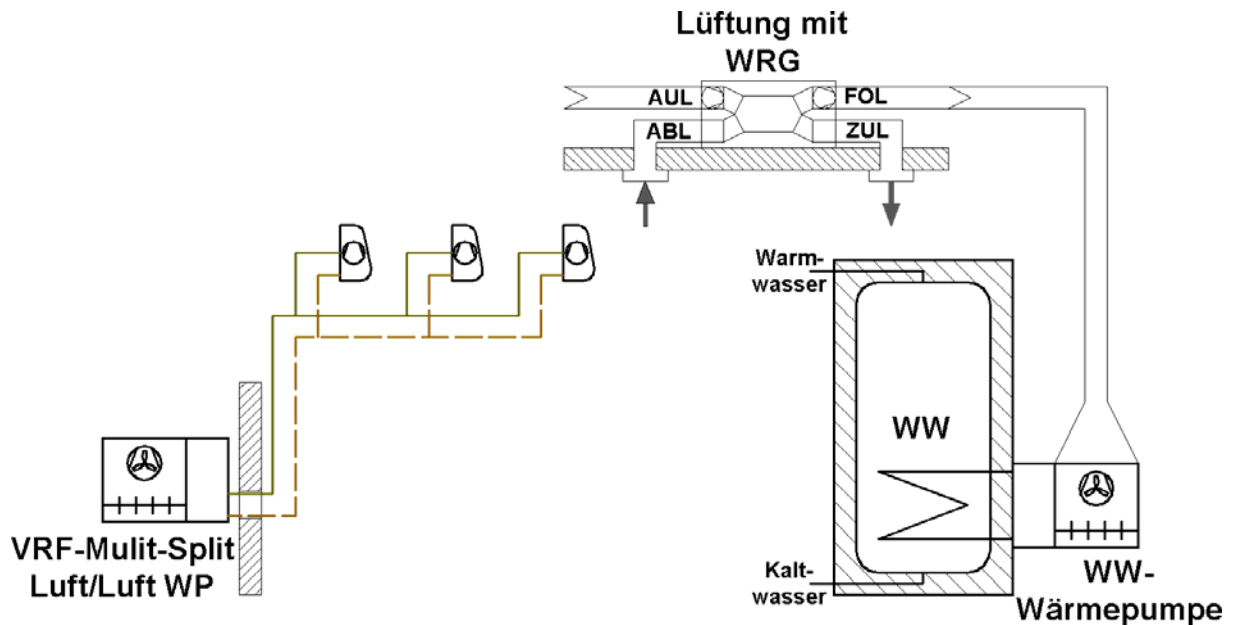


Abb. 5: Standardsystem SEK1, Luft / Luft – Klimagerät mit Umkehrbetrieb

2.3.2. Luft/Wasser-Wärmepumpe

Das Standardsystem SEK2 geht von einer Aussenluft - Wärmepumpe für Heizen und Warmwasserbereitung sowie einer hydraulischen Wärmeverteilung aus. Zur Kühlung ist die Wärmepumpe aktiv im Umkehrbetrieb im Einsatz. Den hygienisch notwendigen Luftwechsel gewährleistet eine separate Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Dabei wird bei der Grundvariante des Standardsystems SEK2 das gleiche Wärmeübergabesystem für Heizen und Kühlen genutzt, beispielsweise eine Fussbodenheizung (s. Abb. 6). Effizient kann die aktive Kälteerzeugung realisiert werden, wenn simultan zur Kälteerzeugung die Abwärme für die Warmwassererwärmung genutzt wird.

Luft/Wasser-Wärmepumpen sind mit fester Drehzahl oder als leistungsgeregelte Geräte verfügbar. Geräte mit fester Drehzahl erfordern, durch eine steigende Wärmeleistung bei steigender Aussenluft-Temperatur, eine grosse Wärmekapazität im Wärmeübergabesystem, wie in Abb. 6 dargestellt, wenn sie ohne technischen Speicher betrieben werden.

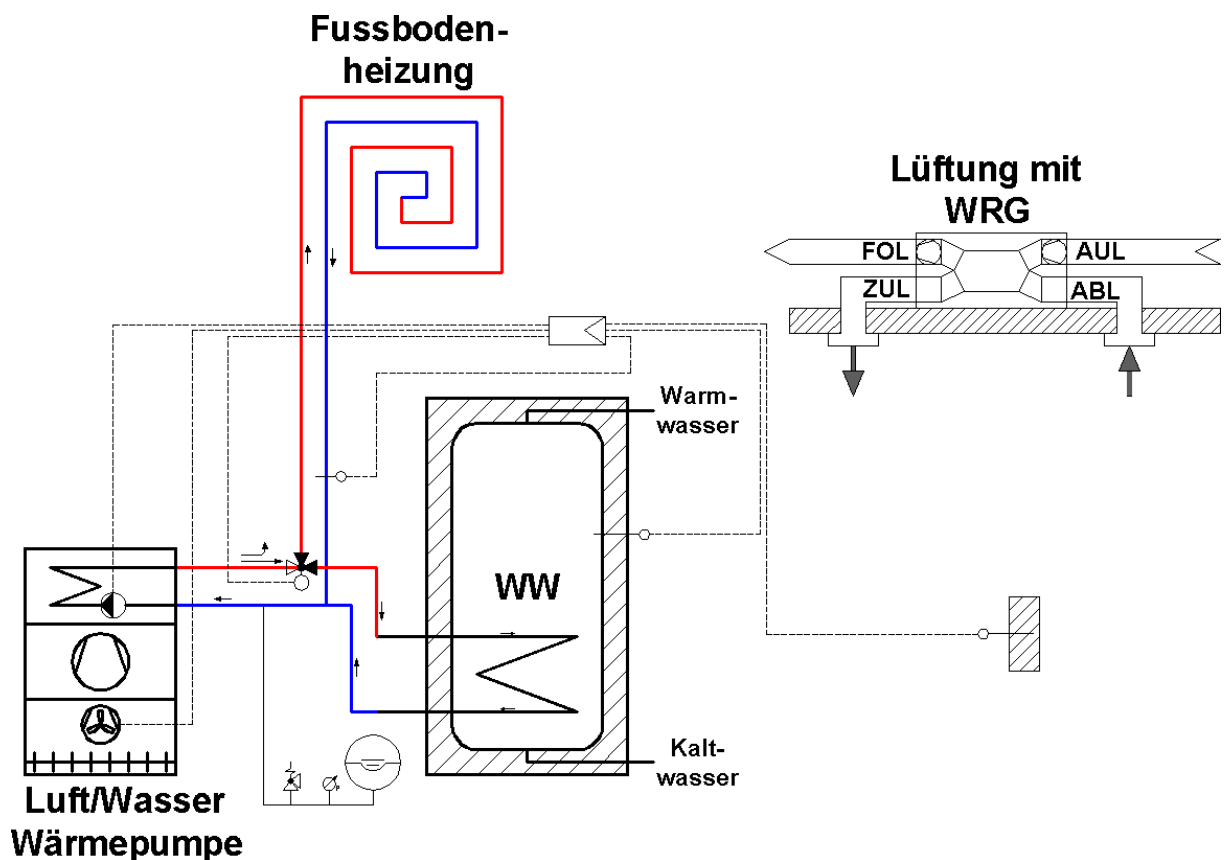


Abb. 6: Standardsystem SEK2, getaktete Luft / Wasser – Wärmepumpe mit Umkehrbetrieb und einem gemeinsamen Wärmeübergabesystem grosser thermischer Kapazität

Alternativ dazu können bei leistungsgeregelten Wärmepumpen separate Wärmeübergabesysteme zum Kühlen, wie eine Kühldecke oder ein Konvektor, eingesetzt werden (s. Abb. 7).

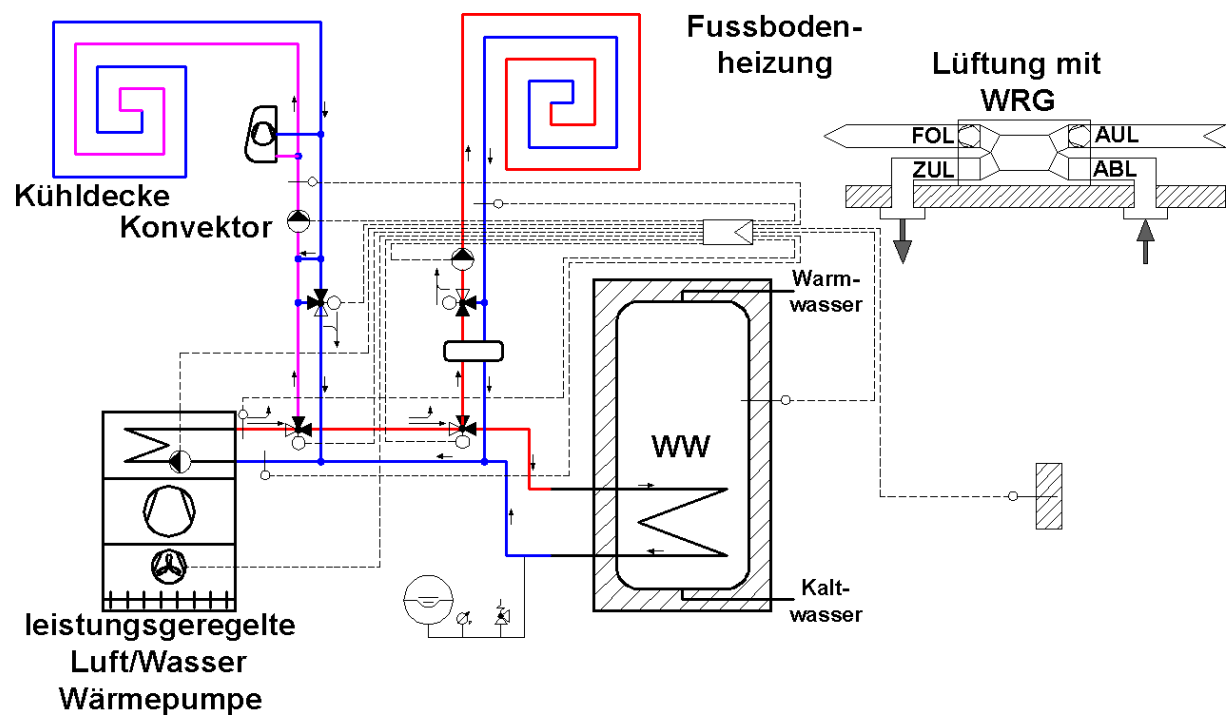


Abb. 7: Standardsystem SEK2, leistungsgeregelte Luft / Wasser – Wärmepumpe mit Umkehrbetrieb und separaten Wärmeübergabesystemen für Heizen und Kühlen

2.3.3. Sole/Wasser-Wärmepumpe

Das System mit dem grössten Potenzial für eine energieeffiziente Beheizung und Kühlung nutzt als Wärmequelle für die Wärmepumpe eine Erdwärmesonde und tauscht die Wärme über eine Niedertemperatur – Fussbodenheizung mit dem Raum aus. Bei diesen Standardsystem SEK3 kann die Erdwärmesonde zur passiven Kälteerzeugung für den Kühlbetrieb direkt an die Fussbodenheizung gekoppelt werden. Der zusätzliche Anlagenaufwand ist gering. Der Aufwand für den Betrieb durch die passive Kälteerzeugung ebenso.

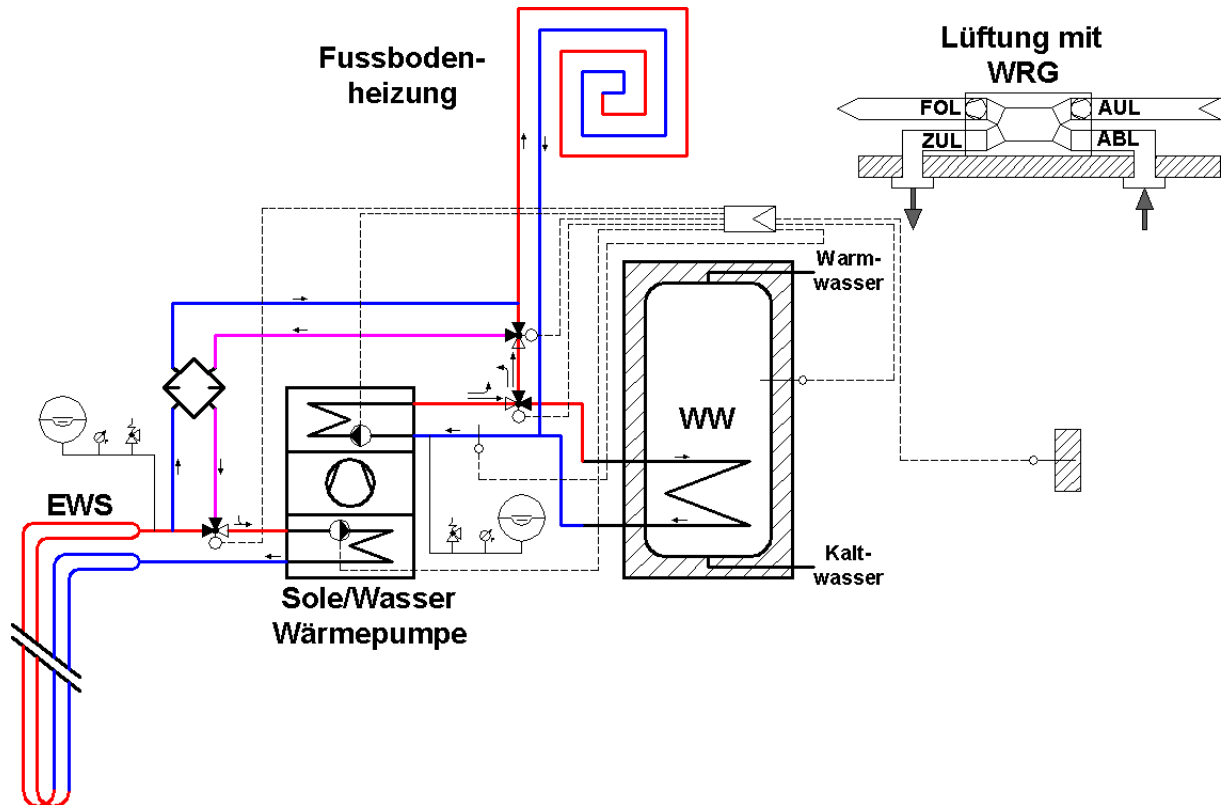


Abb. 8: Standardsystem SEK3, Erdgekoppelte Wärmepumpe mit passiver Kühlung

2.3.4. Minergie-P / Passivhaus Kompaktgeräte

Das vierte Standardsystem ist nur bei Passivhäusern bzw. Minergie-P®-Gebäuden sinnvoll anwendbar. Bei diesen sehr gut wärmedämmten Gebäuden mit niedrigem Wärmebedarf ist es möglich, die Heizwärme mit der Frischluft der Lüftungsanlage ins Gebäude zu transportieren. Dafür haben sich spezielle Wärmepumpen – Kompaktgeräte etabliert, die die Funktionen Heizen, Warmwasserbereitung und Lüftung abdecken. Die Wärmepumpe gewinnt die Umgebungswärme dabei entweder aus der Aussenluft oder ergänzend aus der Abluft der Wohnungslüftung. Hierbei kann wiederum der Wärmepumpenprozess umgekehrt werden, sodass über die Lüftungsanlage das Gebäude auch gekühlt werden kann. Der Vorteil liegt hier darin, dass der Wärmebedarf des Gebäudes so gering ist, dass auch mit einer aktiven Kühlung nur ein geringer zusätzlicher Endenergieaufwand (z.B. Elektrizität) entsteht. Dieses System nutzt Luft als Wärmequelle und -senke. Daher wird es im Systemvergleich in Kapitel 3 nicht separat betrachtet sondern davon ausgegangen, dass die Effizienz abhängig von den eingesetzten Komponenten im Bereich der Systeme SEK1 und SEK2 liegt.

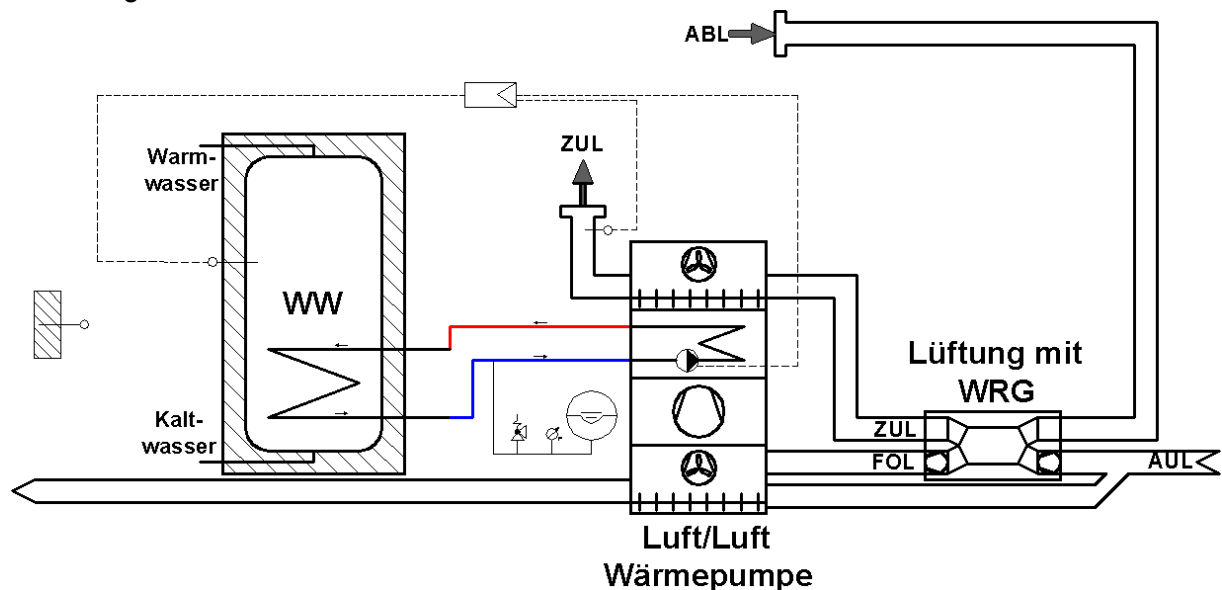


Abb. 9: Standardsystem SEK4, Lüftungs-Wärmepumpen Kompaktgerät

3. Systemvergleich hinsichtlich Energie und thermischer Behaglichkeit

Im vorliegenden Bericht werden Wärmepumpensysteme für Heizung und Warmwasserbereitung betrachtet, welche zusätzlich auch zur Raumkühlung eingesetzt werden. Dabei soll nicht eine maximale Temperatur exakt eingehalten werden, wie es bei Klimaanlage der Fall ist, sondern mit einer ergänzenden Kühlfunktion die thermische Behaglichkeit im Sommer verbessert werden. Eine natürliche Kältequelle begrenzt gegebenenfalls die zur Verfügung stehende Kühlenergie oder Kälteleistung. Andererseits wird nur ein begrenzter zusätzlicher Aufwand akzeptiert.

In Simulationen wurde ein der Realität angenähertes Verhalten des Gesamtsystems Gebäude mit Wärmepumpensystem abgebildet. Dabei werden die Systeme in den Varianten an einem zweistöckigen, theoretischen Einfamilienhaus nach Minergie® in massiver Bauweise mit 200 m² Energiebezugsfläche, quadratischem Grundriss und Flachdach angewendet. Es wird für die Untersuchung aufgeteilt in die zwei Stockwerke Erdgeschoss (EG) und Obergeschoss (OG) und je Stockwerk in die Bereiche Südzone und Nordzone. Zur Reduktion der Wärmelasten werden oberhalb einer Raumtemperatur von 23 °C alle Fenster verschattet, je nach Variante zwischen 25% und 75%. Der mechanische Luftwechsel wird von 0.4-fach auf 1-fach erhöht, sobald die Raumluft-Temperatur über 25 °C steigt und mindestens 2 K über der Aussenluft-Temperatur liegt. Dies erfolgt in der Regel in der Nacht. Eine detaillierte Beschreibung des Gebäudes und der angewendeten Komponenten und Bauteile befindet sich im Anhang: Annahmen und Randbedingungen.

Die folgenden Fragestellungen sind in den weiteren Unterkapiteln detailliert dargestellt und in Tab. 5 in einem Überblick der Ergebnisse dargestellt:

- 3.1 Vergleich der Systeme SEK1, SEK2, SEK3
- 3.2 Welchen Einfluss hat der simultane Warmwasser- und Kühlbetrieb?
- 3.3 Wie wirkt sich Minergie-P® gegenüber Minergie® aus?
- 3.4 Wirkung der passiven Kühlung
- 3.5 Einfluss der passiven Kühlung auf die Erdwärmesonde als Wärmequelle

System	SEK1	SEK2					SEK3					
	L/L-WP	L/W-WP					S/W-WP					
Charakterisierung	ME shd025	ME shd075	ME shd075 C bei W	ME shd025	ME shd025 C bei W	MEP shd025	ME shd075 ohne C	ME shd075	ME shd050	ME shd025	MEP shd025 ohne C	MEP shd025
Kapitel	3.1	3.2	3.2	3.1 3.2 3.3	3.2	3.3	3.4 3.5	3.4 3.5	3.5	3.1 3.3 3.5	3.4	3.3 3.4 3.5
zeitl. Anteil der therm. Behaglichkeit in der Heizperiode in Kat. II	100%	93%	93%	92%	92%	96%	95%	96%	96%	96%	96%	97%
zeitl. Anteil der therm. Behaglichkeit in der Kühlperiode in Kat. III	97%	90%	95%	93%	84%	96%	95%	88%	90%	92%	82%	94%
WNG _C	4.1	2.1	2.4	2.3	2.5	2.3	-/-	8.5	10.5	12.9	-/-	11.8
WNG _{HWC}	3.3	3.1	3.3	3.1	3.3	3.0	4.0	4.4	4.5	4.7	4.0	4.7
E _{HWC}	4'510 kWh	4'955 kWh	4'080 kWh	5'325 kWh	4'042 kWh	4'562 kWh	3'324 kWh	3'531 kWh	3'516 kWh	3'490 kWh	2'726 kWh	2'917 kWh
Investitionsaufwand für Raumkühlfunktion	gering	gering	gering	gering	gering	gering	keine	gering	gering	gering	keine	gering
Gesamt-Betriebskosten	mässig	hoch	mässig	hoch	mässig	hoch	gering	gering	gering	gering	sehr gering	sehr gering
Anforderungen bei Realisierung in Wohnbauten	hoch	mässig	mässig	mässig	mässig	mässig	gering	gering	gering	gering	gering	gering

Tab. 5: Überblick und Bewertung der Systemvarianten aus der Simulationsstudie

Legende für die Charakterisierung: ME – Minergie / MEP – Minergie-P / shd025 – Verschattung aller Fenster zu max. 25% / shd050 – Verschattung aller Fenster zu max. 50% / shd075 – Verschattung aller Fenster zu max. 75% / C bei W – Kühlbetrieb nur simultan zum WW-Betrieb / ohne C – kein Kühlbetrieb

3.1. Vergleich der Systeme SEK1, SEK2, SEK3

Der in diesem Abschnitt dargestellte Vergleich von drei Wärmepumpensystemen mit den Wärmequellen Luft bzw. Erdreich zeigt für ein Referenzgebäude das Verhalten der Systeme zur Abdeckung der Funktionen Heizen, Warmwasserbereitung und Kühlen.

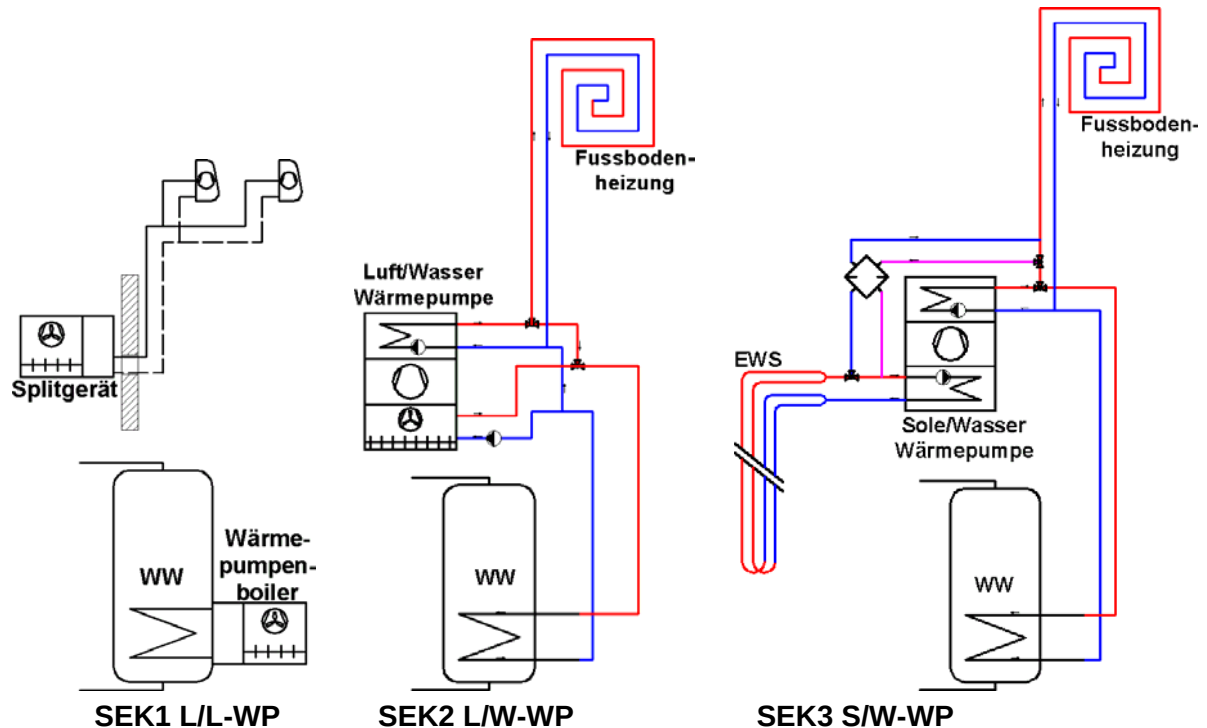


Abb. 10: Aufbau der Standard - Schaltungen in den Grundvarianten SEK1, SEK2, SEK3

In allen Varianten werden die Fenster zu maximal 25% verschattet. Neben dem Gebäude wird die Wärmepumpe inklusive Regelung abgebildet. Die Systeme SEK1, SEK2 und SEK3 sind schematisch in Abb. 10 dargestellt. System SEK1 basiert auf einem Multi-Split Luft/Luft-Klimagerät, welches im Umkehrbetrieb auch zur Beheizung des Gebäudes eingesetzt wird. Die Warmwasserbereitung erfolgt separat über einen der Wohnungslüftungsanlage nachgeschalteten Abluft-Wärmepumpen-Boiler. 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 WP-Heizung und Warmwasserbereitung sowie als Wärmesenke für passive Kühlung.

3.1.1. Welche thermische Behaglichkeit wird erreicht?

Abb. 11 zeigt die Klassifizierung des thermischen Raumklimas für das gesamte Jahr. Insgesamt zeigt sich für alle Varianten SEK1 - SEK3 auch bei einer eher geringen Verschattung ein gutes thermisches Raumklima mit einem jeweils nur geringen Anteil von < 3% in Kategorie IV und dem jeweils grössten Anteil in Kategorie I.

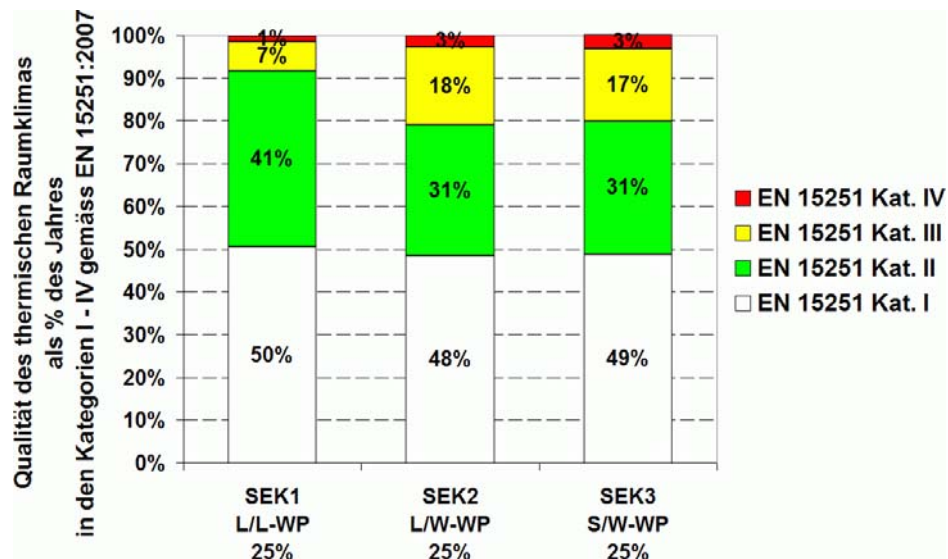


Abb. 11: Klassifizierung des thermischen Raumklimas für das gesamte Jahr

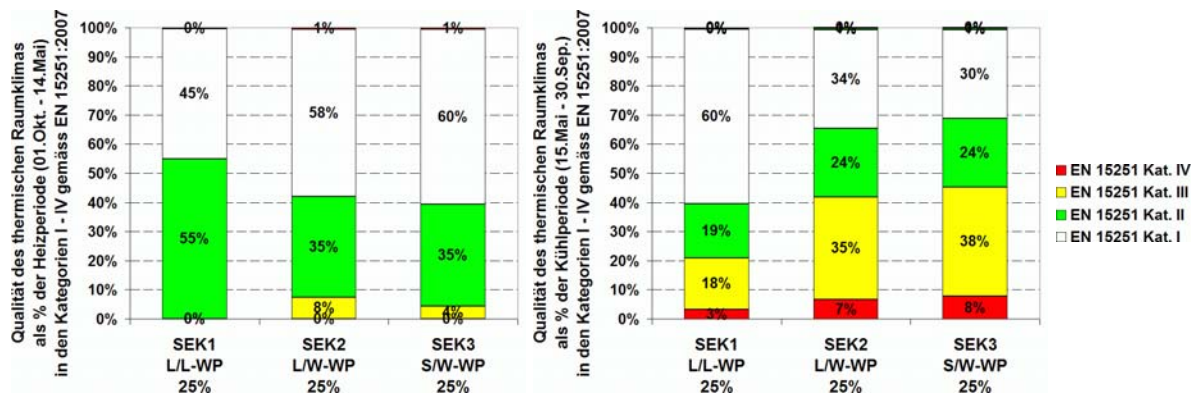


Abb. 12: Klassifizierung des thermischen Raumklimas für die Winterperiode (01. Okt. - 14. Mai links) und die Sommerperiode (15. Mai - 30. Sep. rechts)

Für die Winterperiode zeigt Abb. 12, links, dass für alle Varianten die thermische Behaglichkeit zu mehr als 92% der Zeit innerhalb der Kategorie II liegt. In der Sommerperiode, Abb. 12 rechts, zeigen sich grössere Abweichungen zwischen den Systemvarianten. Dabei erreichen alle Systeme eine Einhaltung der oberen Grenzttemperatur von Kategorie I. Alle Systeme zeigen eine Abweichung der Temperaturen nach unten. Dies ist allerdings nur zum Teil durch die Kühlung verursacht, wie SEK1 zeigt. Zum anderen Teil sind die Temperaturen durch die Berücksichtigung der Übergangszeiten verursacht, in der weder das Heiz- noch das Kühlsystem aktiv sind. Die Systeme SEK2 und SEK3 mit Fussbodenkühlung zeigen eine etwas stärkere Tendenz zu kühleren Temperaturen. Die Ursache für diese unterschiedlichen Charakteristiken zeigen die Darstellungen der operativen Raumtemperatur der Systeme SEK1 (Abb. 13) bis SEK3 (Abb. 15).

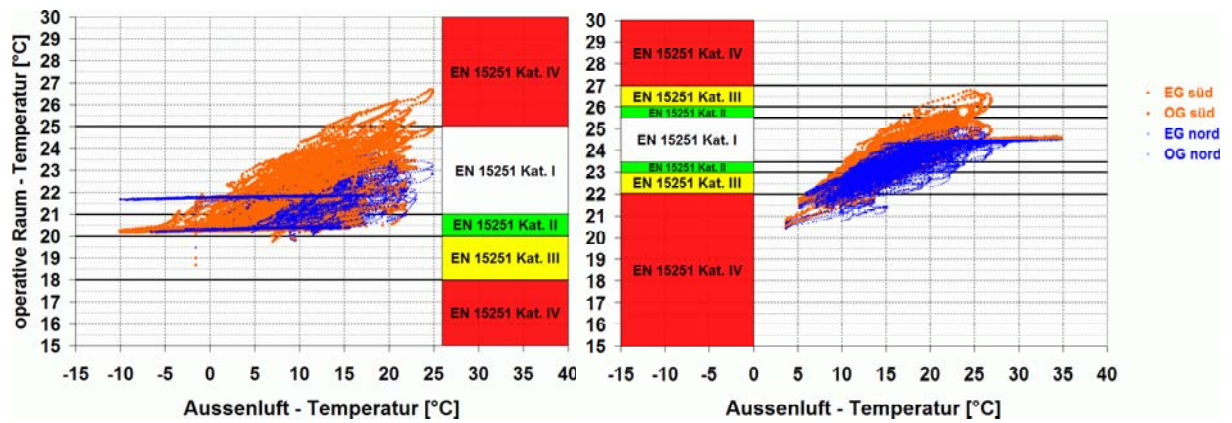


Abb. 13: Verteilung der operativen Raumtemperatur in Bezug zur Aussenluft-Temperatur für das System SEK1; links Winterperiode (01. Okt. - 14. Mai), rechts Sommerperiode (15. Mai - 30. Sep.)

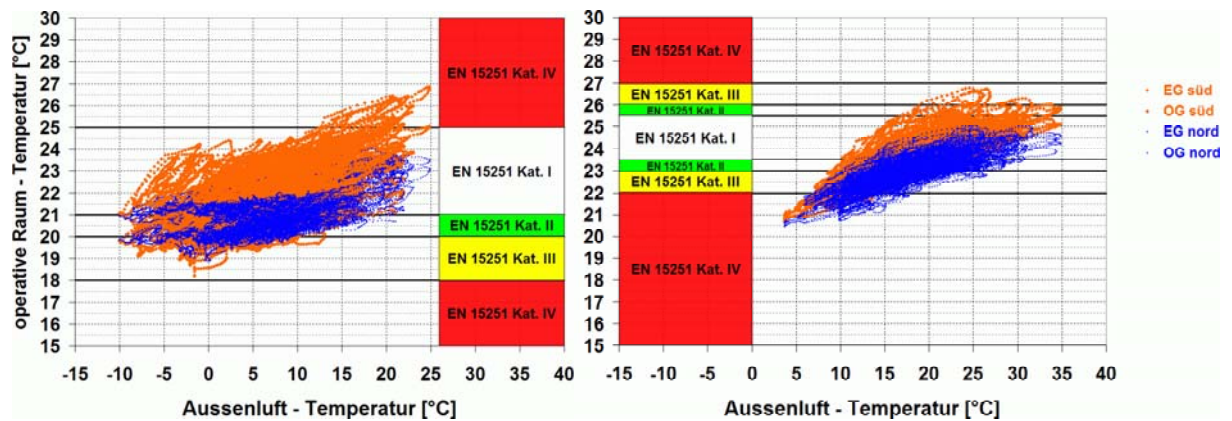


Abb. 14: Verteilung der operativen Raumtemperatur in Bezug zur Aussenluft-Temperatur für das System SEK2; links Winterperiode (01. Okt. - 14. Mai), rechts Sommerperiode (15. Mai - 30. Sep.)

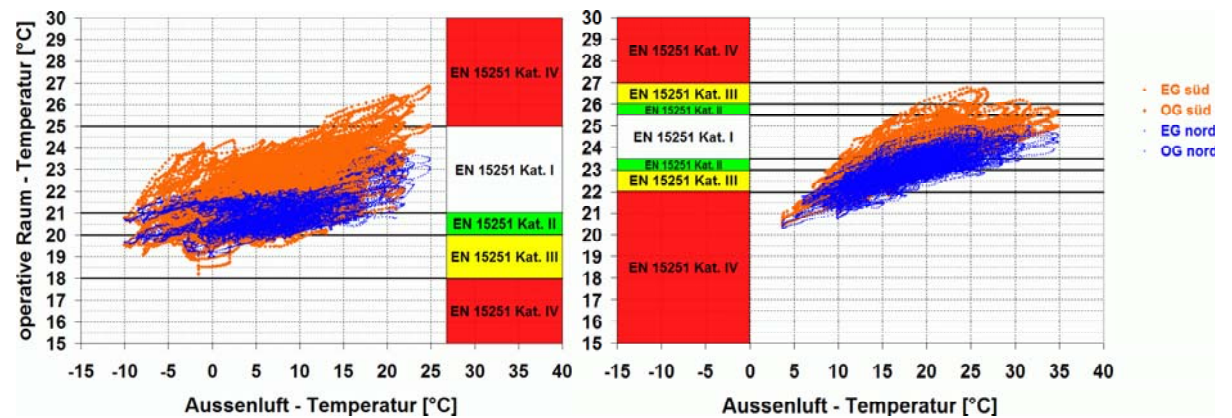


Abb. 15: Verteilung der operativen Raumtemperatur in Bezug zur Aussenluft-Temperatur für das System SEK3; links Winterperiode (01. Okt. - 14. Mai), rechts Sommerperiode (15. Mai - 30. Sep.)

Für das System SEK1, die Multi-Split Anlage, ist eine deutliche Grenzkurve mit einer konstanten operativen Raumtemperatur erkennbar. Durch die Einbringung der Heiz-/Kühlleistung direkt in den Raum ist eine einfachere Einstellung und Erreichung der gewünschten Raumtemperatur möglich. Dies zeigt sich sowohl für die Winter- als auch für die Sommerperiode. Für die Systeme SEK2 (Abb. 14) und SEK3 (Abb. 15) zeigt sich eine breitere Streuung der Raumtemperatur bei konstanter Aussentemperatur. Dies ist vorwiegend bedingt durch die zeitliche Pufferwirkung des Fussbodenaufbaus und damit verzögerte Einbringung der Heiz-/Kühlleistung in den Raum. Diese grössere Streubreite der Raumluft-Temperatur bei gleicher Aussenluft-Temperatur erfordert im Umkehrschluss eine genauere Auslegung, damit der gewünschte Temperaturbereich eingehalten werden kann.

Behaglichkeitsdarstellung mit aktivem und inaktivem Betrieb

Die Klassifizierung des thermischen Raumklima gemäss Abb. 12 zeigt einen Anteil der operativen Raumtemperaturen, welche während der Sommerperiode unterhalb der Kategorie III gemäss EN 15251 in der Behaglichkeitsbewertung liegen. Abb. 16 zeigt die Ursache für diese Bewertung darin, dass sowohl der aktive Kühlbetrieb, als auch die Zeiten mit inaktivem Wärmepumpensystem, in denen die Raumtemperatur sich frei schwingend einstellt, zusammenfassend bewertet werden. Abb. 16 links zeigt nur die Zeiten mit aktivem Wärmepumpenbetrieb für das System SEK2 während der Sommerperiode. Hier liegen die operativen Raumtemperaturen bis auf einzelne 15-Minuten-Werte innerhalb der Kategorie III gemäss EN 15251. Während der Zeiten ohne aktiven WP-Betrieb, dargestellt in Abb. 16 rechts, zeigen sich die Abweichungen der operativen Raumtemperaturen nach unten, verursacht durch kältere Aussentemperatur-Bedingungen in der Sommerperiode. Eine zusammenhängende Darstellung und zeitlich durchgehende Bewertung wird für sinnvoll erachtet, da die Nutzung eines Wohngebäudes durch unterschiedliche Lebensgestaltung zeitlich nicht vorhersagbar und auch nicht beschränkt ist.

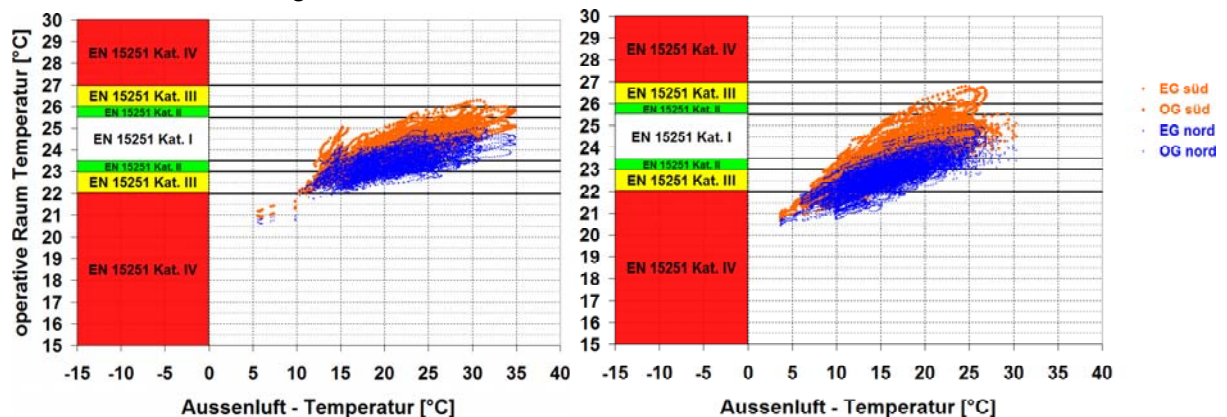


Abb. 16: Gegenüberstellung der Behaglichkeitscharakteristik von aktivem Kühlbetrieb (links) und inaktivem WP-System (rechts) für das System SEK2 in der Sommerperiode (15. Mai - 30. Sep.)

3.1.2. Wie hoch ist der Aufwand und welche Effizienz kann erreicht werden?

In Abb. 17 werden für die drei Systeme die erzeugte Wärme und in Abb. 18 der elektrische Aufwand verglichen. Der Warmwasser-Wärmebedarf ist für alle Systeme gleich und setzt sich aus 13.9 kWh/m²/a Nutzwärmebedarf zuzüglich 2.8 kWh/d Wärmeverluste zusammen. Der Heizwärmebezug unterscheidet sich aufgrund der durch die Regelung verursachten unterschiedlichen Raumtemperaturen zwischen 8711 kWh/a für das System SEK1 und 9372 kWh/a für das System SEK3. Im Klimakältebezug zeigen sich durch die unterschiedliche Verteilung der Raumtemperaturen auch grössere relative Unterschiede, wobei System SEK1 mit 2258 kWh/a den geringsten Klimakältebezug aufweist und SEK2 mit 3133 kWh/a den höchsten. System SEK1 weist insgesamt die geringste erzeugte Nutzwärme auf. Auf Seiten des elektrischen Aufwands zeigt sich ein deutlich anderes Bild. Hier weist System SEK3 den geringsten elektrischen Aufwand sowohl in den einzelnen Funktionen als auch insgesamt auf. Das System SEK1 fällt mit dem höchsten Elektrizitätsbezug für Warmwasserbereitung, das System SEK2 mit dem höchsten Elektrizitätsbezug für Klimakälte auf.

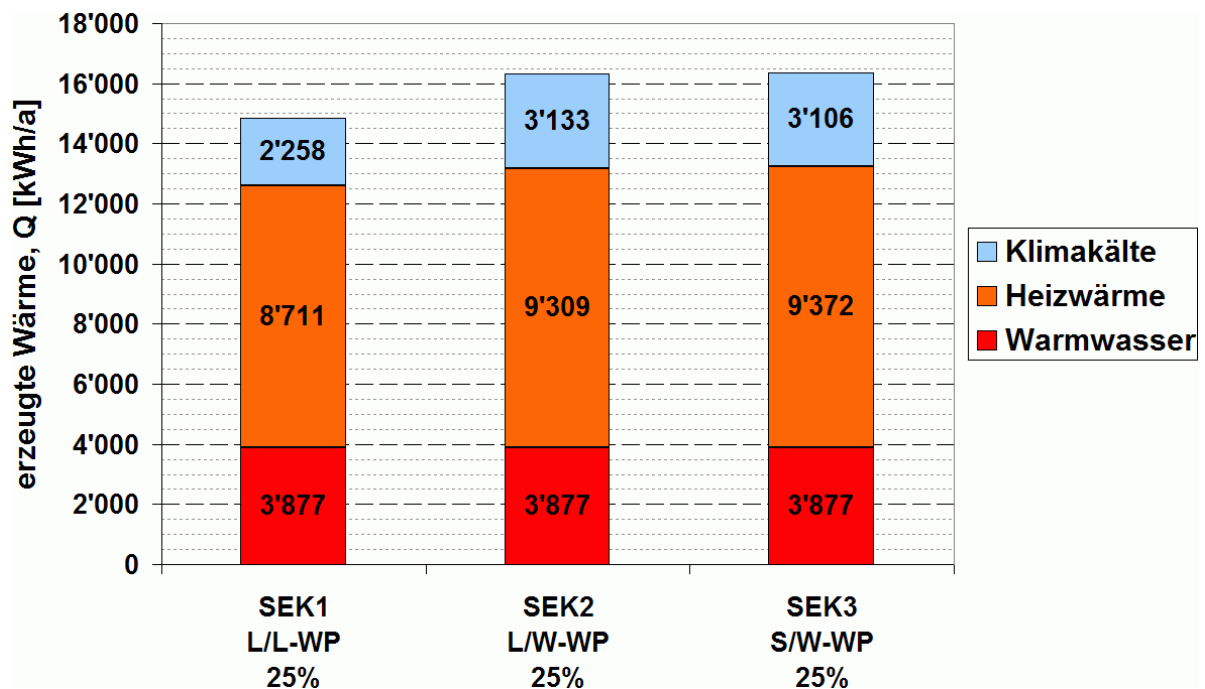


Abb. 17: Vergleich der erzeugten Wärme für die Systemvarianten SEK1 - 3

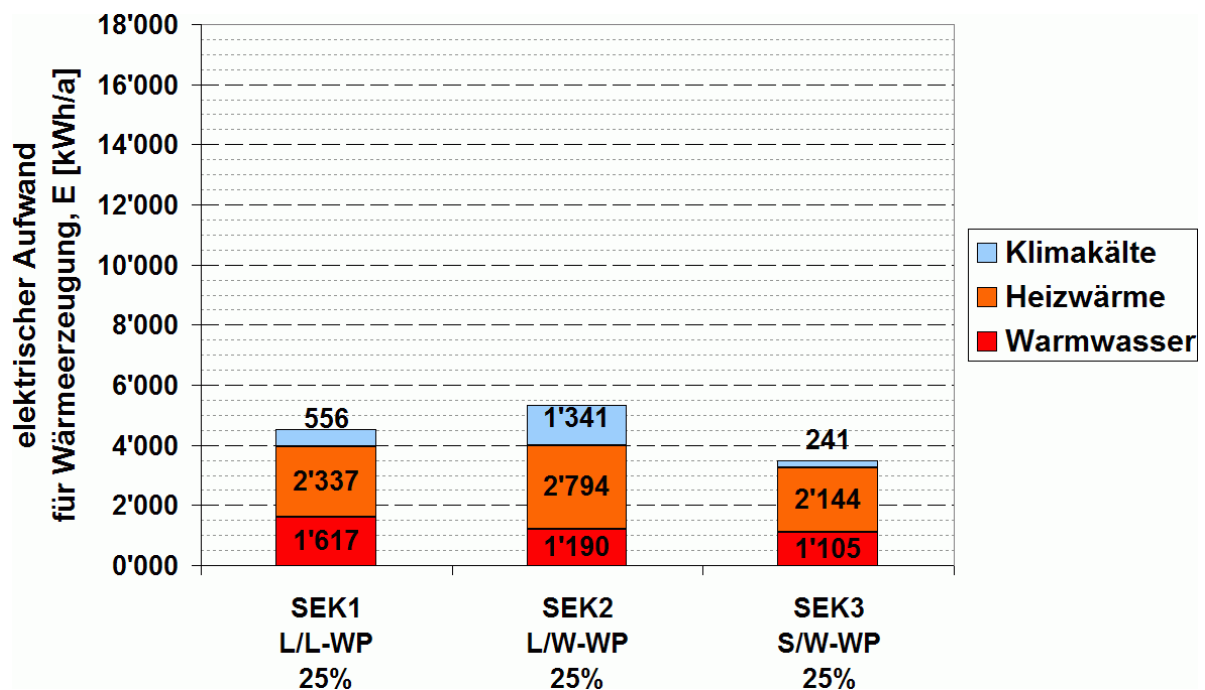


Abb. 18: Vergleich der aufgewendeten elektrischen Energie für die Systemvarianten SEK1 - 3

Die Ursache für den geringen elektrischen Energiebezug von SEK3 zeigt sich im Vergleich der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrade in Abb. 19 mit dem hohen Nutzungsgrad im passiven Kühlbetrieb von 12.9. Auch im Warmwasser- und Heizbetrieb weist SEK3 die höchsten Nutzungsgrade von 3.5 für Warmwasser, 4.4 im Heizbetrieb und 4.7 über alle Betriebsarten auf. Sowohl vom gesamten elektrischen Aufwand als auch vom Nutzungsgrad im Kühlbetrieb und über alle Betriebsarten am schlechtesten stellt sich System SEK2 dar. System SEK1 erreicht im Kühlbetrieb zwar einen durch den geringen Temperaturhub hohen Nutzungsgrad von 4.1 für aktiven Kühlbetrieb und dadurch nur mässigen elektrischen Aufwand. Mit dem geringen Nutzungsgrad im Warmwasserbetrieb von 2.4 des Abluft-Wärmepumpen-Boilers nach der Lüftungswärmerückgewinnung und in allen Betriebsarten aktiver Wärmepumpe können die Nutzungsgrade und der elektrische Aufwand von System SEK3 nicht erreicht werden. Die Erdwärmesonde zeigt sich als günstigste Wärmequelle für alle Betriebsarten.

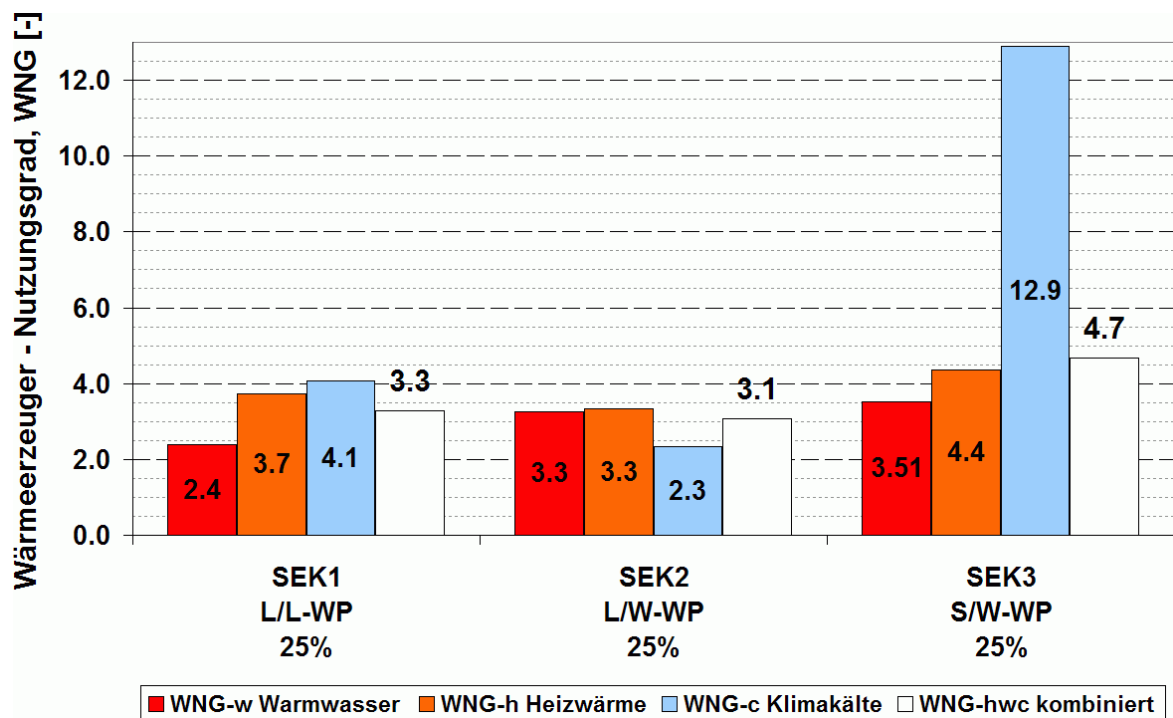


Abb. 19: Vergleich der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrade der Funktionen Heizen, Warmwasser, Kühlen und kombiniert für die Systemvarianten SEK1, SEK2 und SEK3

3.1.3. Fazit

Die mit Abstand höchste Effizienz erreicht eine passive Kühlung mit Erdwärmesonden mit einem Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad über alle Betriebsarten von 4.7. Bei normaler Wohnnutzung und Niedertemperatur-Auslegung des Wärmeübergabesystems wird eine sehr gute thermische Behaglichkeit erreicht. Ergänzend wird ein begünstigender Effekt auf die Effizienz der sommerlichen Warmwasser-Bereitung erreicht. Der Zusatzaufwand einer passiven Kühlfunktion ist gering.

Die insgesamt schlechteste Effizienz über alle Betriebsarten erreicht eine Luft/Wasser-Wärmepumpe mit aktiver Kühlung im Umkehrbetrieb mit 3.1. Einerseits gestaltet sich die zielgerichtete Erreichung behaglicher Raumtemperaturen mit trägen Wärmeübergabesystemen im sommerlichen Kühlbetrieb schwieriger, woraus ein erhöhter Klimakältebezug resultiert. Andererseits erreicht dieses System zwar einen akzeptablen Warmwasser-Nutzungsgrad von 3.3, aber die im Vergleich schlechtesten Effizienzen im Heiz- und Kühlbetrieb mit 3.3 respektive 2.3. Ein Vorteil ist der geringste Infrastrukturaufwand, da mit einer Maschine alle drei Betriebsmodi bereitgestellt werden.

Eine hohe Effizienz im aktiven Wärmepumpenbetrieb erreicht eine gute Multi-Split-VRF-Luft/Luft-Wärmepumpe mit 3.7 für Heizen und 4.1 für Kühlen. Mit dieser kann die beste thermische Behaglichkeit bezogen auf die operative Raumtemperatur erreicht werden. Die Adaption an wechselnde Lastbedingungen bezüglich Temperatur und Luftfeuchte, verursacht durch wechselnde Verschattung oder Personenbelegung, gelingt am einfachsten. Somit kann der geringste Klimakältebezug erreicht werden. Ein Nachteil ist die im ganzen Gebäude verteilte, grosse Kältemittelmenge. Weiterhin fordert die Wärmeübergabe im Raum mit einem Umluftsystem bei der Planung eine besondere Beachtung potenzieller Geräuschemissionen und Zugluft-Erscheinungen. Die Warmwasserbereitung mit einer Abluft-Wärmepumpe nach der, bei allen Systemen einheitlichen Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, ist eine zwar kostengünstige Anlage, weist aber einen nur geringen Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad von 2.4 auf.

3.2. Welchen Einfluss hat der simultane Warmwasser- und Kühlbetrieb?

Mit dem System SEK2 L/W-WP kann nur mit aktivem Wärmepumpenbetrieb gekühlt werden, da die Wärmequelle/-senke Aussenluft keine zusätzliche Möglichkeit einer natürlichen Wärmesenke beinhaltet, die durch die Wärmepumpe erschlossen werden kann. Eine passive Kühlung mittels Nachtlüftung sollte in der Wohnungslüftungsanlage integriert sein. Allerdings lässt sich die im Kühlbetrieb entstehende Abwärme nutzen. Bei den hier betrachteten Wohngebäuden besteht im Normalfall ein Wärmebedarf im Zeitraum mit Klimakältebedarf nur für die Warmwasserbereitung. Dabei werden dann sowohl die mit der Wärmepumpe erzeugte Wärme als auch die erzeugte Kälte genutzt – ein zweifacher Nutzen bei gleichem Aufwand. Zur Evaluation dieser Möglichkeit und zum Aufzeigen der Sensitivität der Verschattung werden eine Gebäudevariante des Referenzgebäudes mit starker Verschattung (max. 75%) und geringer Verschattung (25%) mit durchgehendem Kühlbetrieb jeweils ohne Wärmerückgewinnung für die Warmwasserbereitung und mit simultanem Kühl- und Warmwasserbetrieb (C simul. W) gegenübergestellt.

3.2.1. Welche thermische Behaglichkeit wird erreicht?

Die erreichte thermische Behaglichkeit für die vier Varianten ist für das gesamte Jahr in Abb. 20, für die Winterperiode in Abb. 21 links und für die Sommerperiode in Abb. 21 rechts dargestellt. Während der Winterperiode werden für alle Varianten nahezu identische Anteile der Behaglichkeitsklassen erreicht, wobei insgesamt zu mehr als 92% der Zeit Kategorie II erreicht wird. Auch die geringere Verschattung zeigt nur einen schwachen Einfluss mit leicht höheren Spitzentemperaturen.

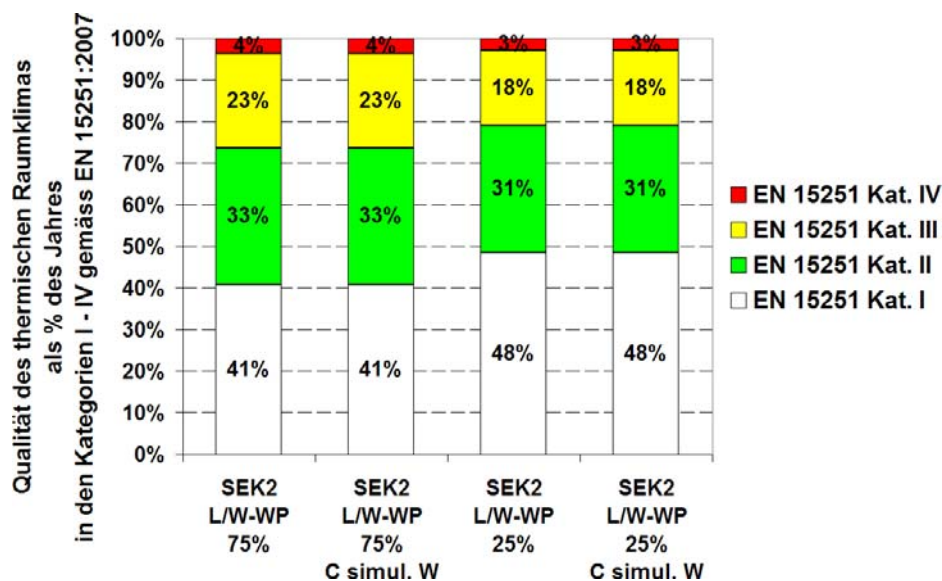


Abb. 20: Klassifizierung des thermischen Raumklimas für das gesamte Jahr

Die sommerliche Behaglichkeit mit durchgehendem Kühlbetrieb zeigt für beide Verschattungsvarianten eine intensive Kühlung bei einer guten thermischen Behaglichkeit am unteren Rand des Behaglichkeitsfeldes. Die Varianten mit reiner Wärmeabfuhr unterscheiden sich nicht von den Varianten mit simultanem Kühl- und Warmwasserbetrieb (C simul. W). Es wird eine gute thermische Behaglichkeit erreicht, wobei die operativen Temperaturen grösstenteils (>90%) innerhalb Kategorie III liegen.

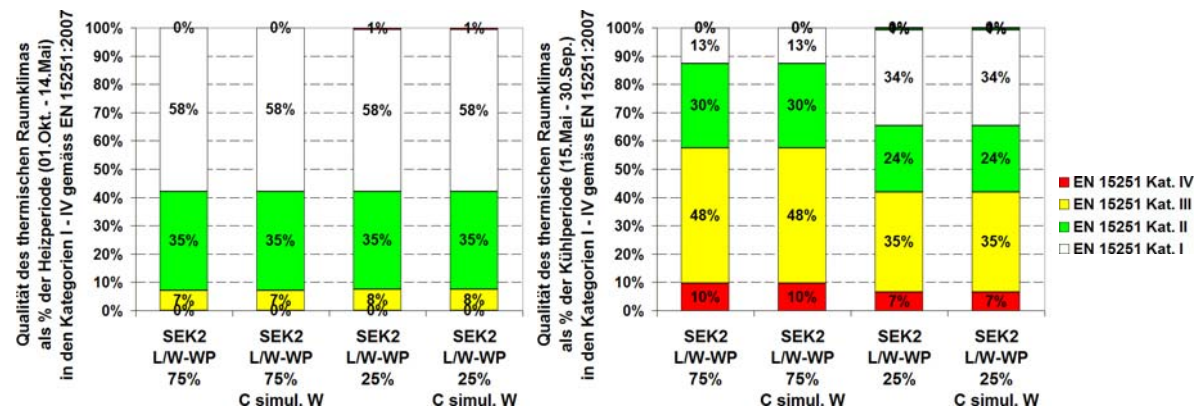


Abb. 21: Klassifizierung des thermischen Raumklimas für die Winterperiode (01. Okt. – 14. Mai links) und die Sommerperiode (15. Mai – 30. Sep. rechts)

3.2.2. Wie hoch ist der Aufwand und welche Effizienz kann erreicht werden?

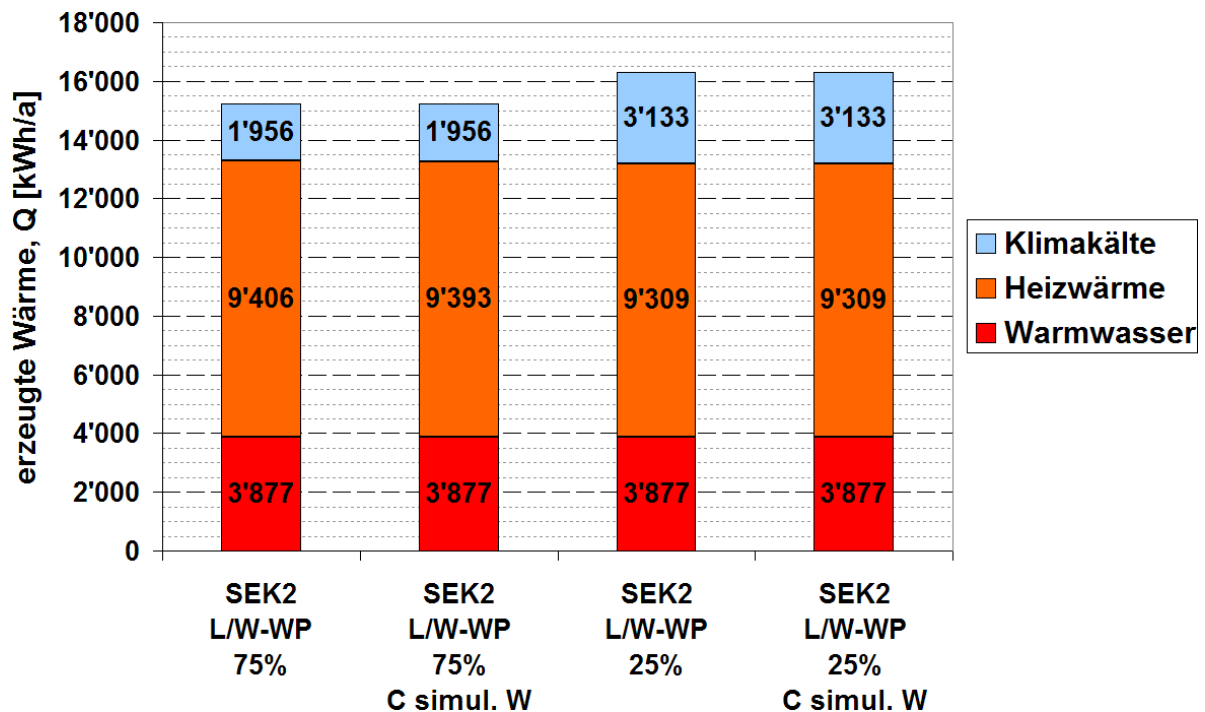


Abb. 22: Vergleich der erzeugten Wärme für die Systemvarianten SEK2

Alle Varianten zeigen eine intensive Nutzung der Kühlfunktion. Eine geringere Verschattung von maximal 25% führt zu einer Erhöhung der Wärmeabfuhr von 1'956 kWh/a auf 3'133 kWh/a. Im Betriebsmodus Kühlung simultan zur Warmwassererzeugung (C simul. W), also mit direktem Transfer der Wärme aus dem Raum zur Warmwasserbereitung, kann nur eine sehr begrenzte Wärmeabfuhr von 354 kWh/a realisiert werden. Das entspricht 11% - 18% der insgesamt abgeführten Wärme. Obwohl der gesamte Wärmebezug von 3'877 kWh/a zur Warmwasserbereitung grösser ist als die Wärmeabfuhr von 1'956 kWh/a respektive 3'133 kWh/a für eine intensive Raumkühlung, kann nur ein kleiner Anteil der Kühlabwärme im Sommer direkt für den übers Jahr gleichmässig anfallenden Warmwasser-Wärmebezug genutzt werden. In der erzeugten Wärme zeigt sich nur ein sehr geringer Einfluss der Verschattung auf den Heizwärmebezug mit einer Differenz von 125 kWh/a oder 1.3% zwischen den beiden linken Varianten mit 9'393 kWh/a und den beiden rechten Varianten mit 9'268 kWh/a. Der durch die Kühlung bedingte Mehrbezug an Heizwärme liegt auf einem nicht mehr relevant geringen Niveau. Bei einer Verschattung von maximal 75% beträgt er 13 kWh/a (0.1%). Bei einer Verschattung von maximal 25% beträgt er 41 kWh/a (0.4%).

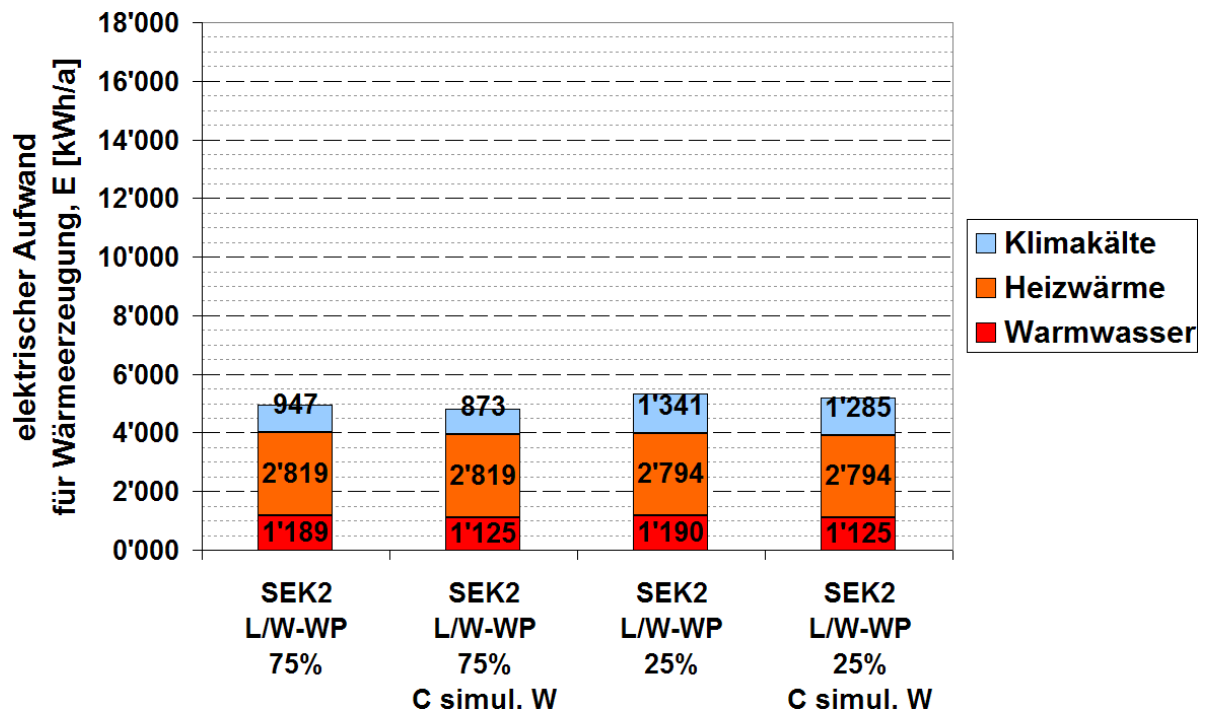


Abb. 23: Vergleich der aufgewendeten elektrischen Energie für die Systemvarianten SEK2

Der elektrische Aufwand zur Wärmeerzeugung (Abb. 23) zeigt durch die in allen Betriebsarten aktive Wärmepumpe ein Bild analog dem für die erzeugte Wärme. Der simultane Kühl- und Warmwasserbetrieb senkt durch die Abwärmenutzung den elektrischen Aufwand für die Kühlung und die Warmwasserbereitung. Für die Varianten mit starker Verschattung (75%) sinkt der gesamte elektrische Aufwand um 138 kWh/a von 4955 kWh/a auf 4817 kWh/a, für die Varianten mit geringer Verschattung um 121 kWh/a von 5325 kWh/a auf 5204 kWh/a.

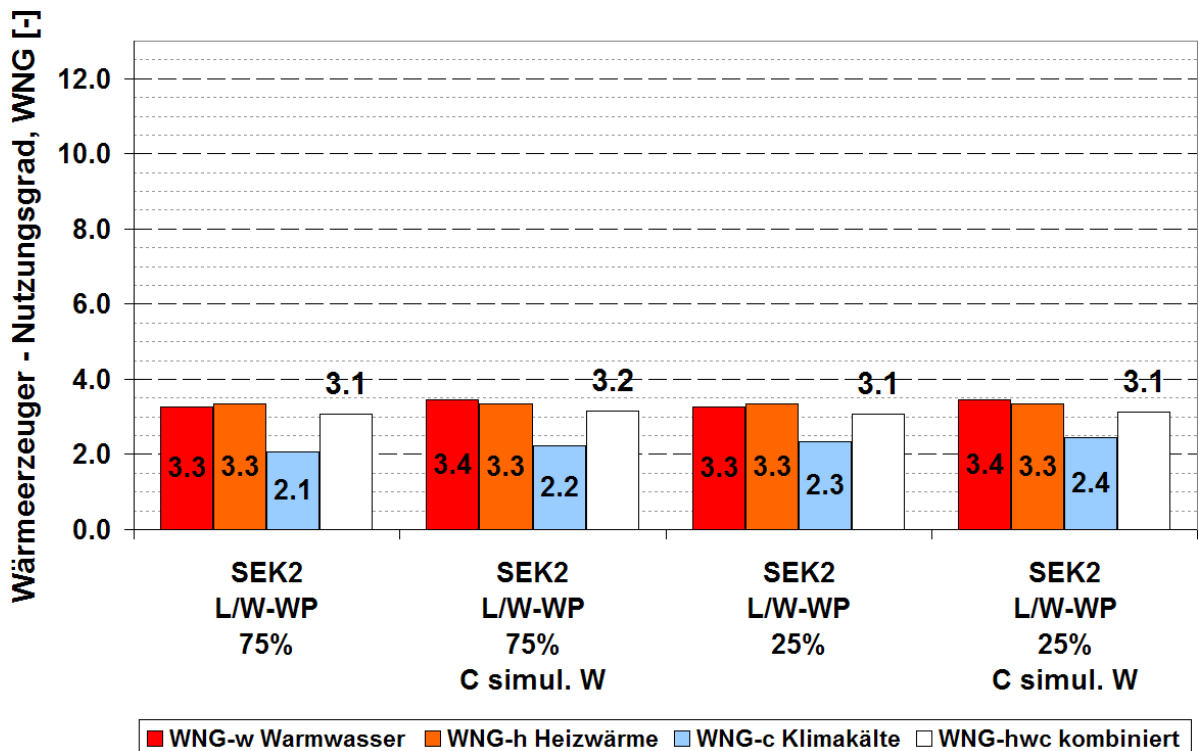


Abb. 24: Vergleich der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrade der Funktionen Heizen, Warmwasser, Kühlen und kombiniert für die Systemvarianten SEK2

Die Wärmeerzeuger-Nutzungsgrade für Heizbetrieb und Warmwassererzeugung unterscheiden sich zwischen den Varianten nur geringfügig. Der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad liegt bei Kühlbetrieb mit Wärmeabfuhr mit 2.1 respektive 2.3 eher niedrig. Im simultanen Warmwasser- und Kühlbetrieb liegt der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad deutlich höher im Bereich 4.2 bis 5.7. Allerdings wirkt sich dieser höhere WNG nur geringfügig auf den jährlichen WNG im Warmwasserbetrieb aus mit Wärmeerzeuger-Nutzungsgraden von 2.2 respektive 2.4 aus, weil der simultane Warmwasser- und Kühlbetrieb einerseits einen geringen energetischen Anteil ausmacht und andererseits der Stand-By Anteil im Kühlbetrieb geringfügig steigt.

3.2.3. Fazit

Eine Einschränkung des Raumkühlbetriebs auf Zeiten, in denen die Abwärme zur Warmwasserbereitung genutzt werden kann, würde nur zu einem sehr geringen Kühleffekt führen. Der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad während dem simultanen Warmwasser- und Kühlbetrieb liegt mit 4.2 bis 5.7 für 15-Minuten-Werte zwar deutlich über den sonst vom System erreichten Nutzungsgraden im Bereich von 2.5, aber immer noch deutlich unter dem passiven Kühlbetrieb und in einem Bereich der mit guten Klimageräten auch ohne Abwärmenutzung erreicht wird. Der Effekt auf den Jahres-Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad liegt bei 0.1 Nutzungsgradpunkten für den Warmwasserbetrieb, den Kühlbetrieb und auch über alle Betriebsarten.

3.3. Wie wirkt sich Minergie-P® gegenüber Minergie® aus?

Im folgenden Vergleich soll die Auswirkung der Gebäudehülle auf Behaglichkeit, Effizienz, Energiebezug und Energieaufwand untersucht werden. Dazu wird das Referenzgebäude ausgeführt als Minergie® Gebäude einem identischen Minergie-P® Gebäude (MEP) gegenübergestellt. In beiden Gebäuden bleibt die Energiebezugsfläche gleich mit 200 m². Aufgrund der stärkeren Dämmung reduziert sich die Nettogeschossfläche von 167 m² auf 159 m². Auf die beiden Gebäudevarianten mit geringer Verschattung (25%) werden das System SEK2 L/W-WP mit aktiver Kühlung und das System SEK3 S/W-WP mit passiver Kühlung angewendet.

3.3.1. Welche thermische Behaglichkeit wird erreicht?

Für alle vier Varianten wird, wie in Abb. 25 dargestellt, eine übers Jahr gute thermische Behaglichkeit, gemessen an der operativen Raumtemperatur, erreicht. Der Unterschied zwischen den Varianten Minergie® und Minergie-P® für die winterliche thermische Behaglichkeit innerhalb Kategorie II sind mit 92% gegenüber 96% für das System SEK2 respektive 96% gegenüber 97% für das System SEK3 gering. Für die sommerliche thermische Behaglichkeit innerhalb Kategorie III zeigt sich ein ähnliches Bild mit 93% gegenüber 96% für System SEK2 und 92% gegenüber 94% für das System SEK3.

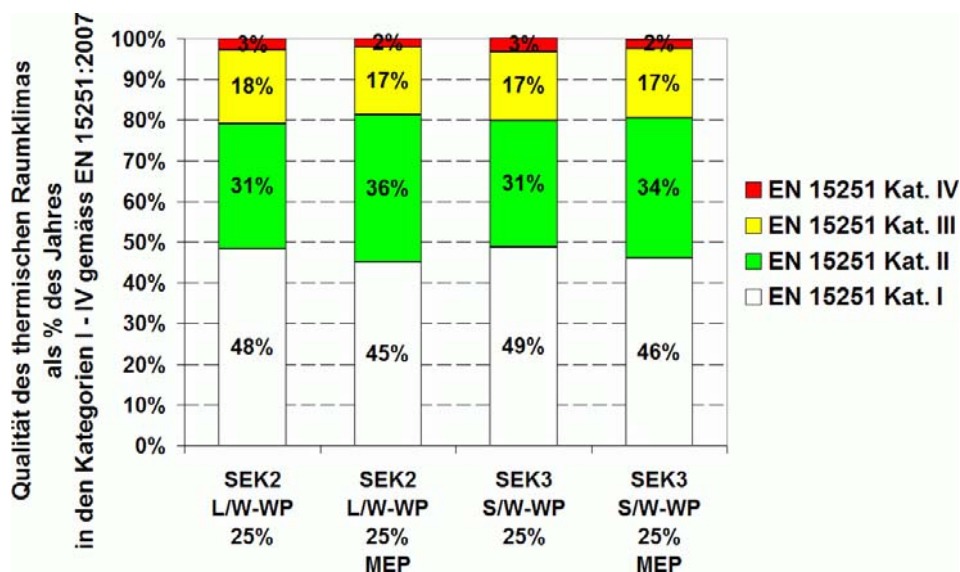


Abb. 25: Klassifizierung des thermischen Raumklimas für das gesamte Jahr

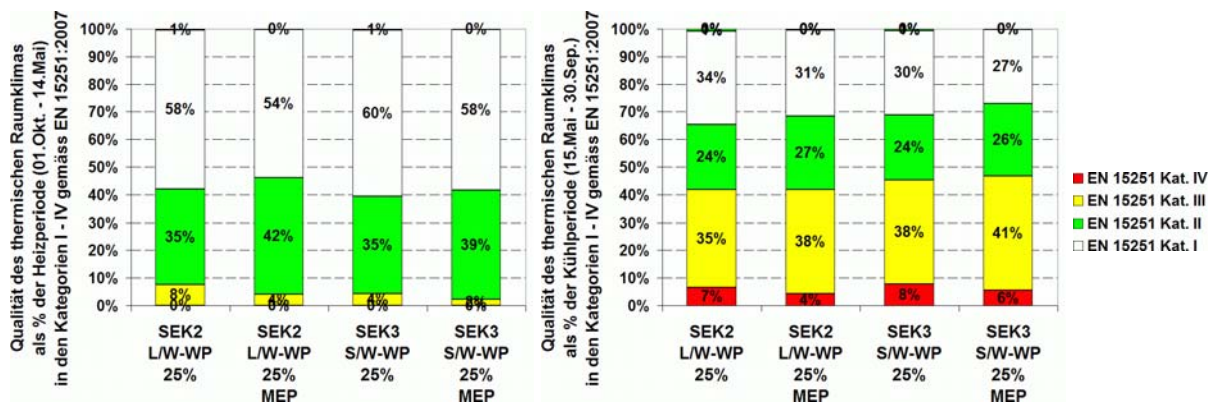


Abb. 26: Klassifizierung des thermischen Raumklimas für die Winterperiode (01. Okt. – 14. Mai links) und die Sommerperiode (15. Mai – 30. Sep. rechts)

3.3.2. Wie hoch ist der Aufwand und welche Effizienz kann erreicht werden?

Für die beiden Gebäudevarianten nach Minergie-P® reduziert sich der Heizwärmebezug (s. Abb. 27) erwartungsgemäss deutlich um 25%, mit 6'932 kWh/a gegenüber 9'309 kWh/a respektive 6'985 kWh/a gegenüber 9'372 kWh/a, verglichen mit dem jeweiligen Gebäude gemäss Minergie®. Der Bezug an Klimakälte liegt für die beiden Minergie-P® ebenso niedriger mit einer Reduktion von jeweils 9%, von 3'133 kWh/a zu 2'853 kWh/a für das System SEK2 und von 3'106 kWh/a zu 2'839 kWh/a für das System SEK3. Die stärkere Isolation der Gebäudehülle führt also zu einer deutlichen Reduktion des Heizwärmebezuges von 25%. Der Klimakältebezug reduziert sich mit einer Differenz von 9% auch, die Differenz ist allerdings deutlich geringer als beim Heizwärmebezug.

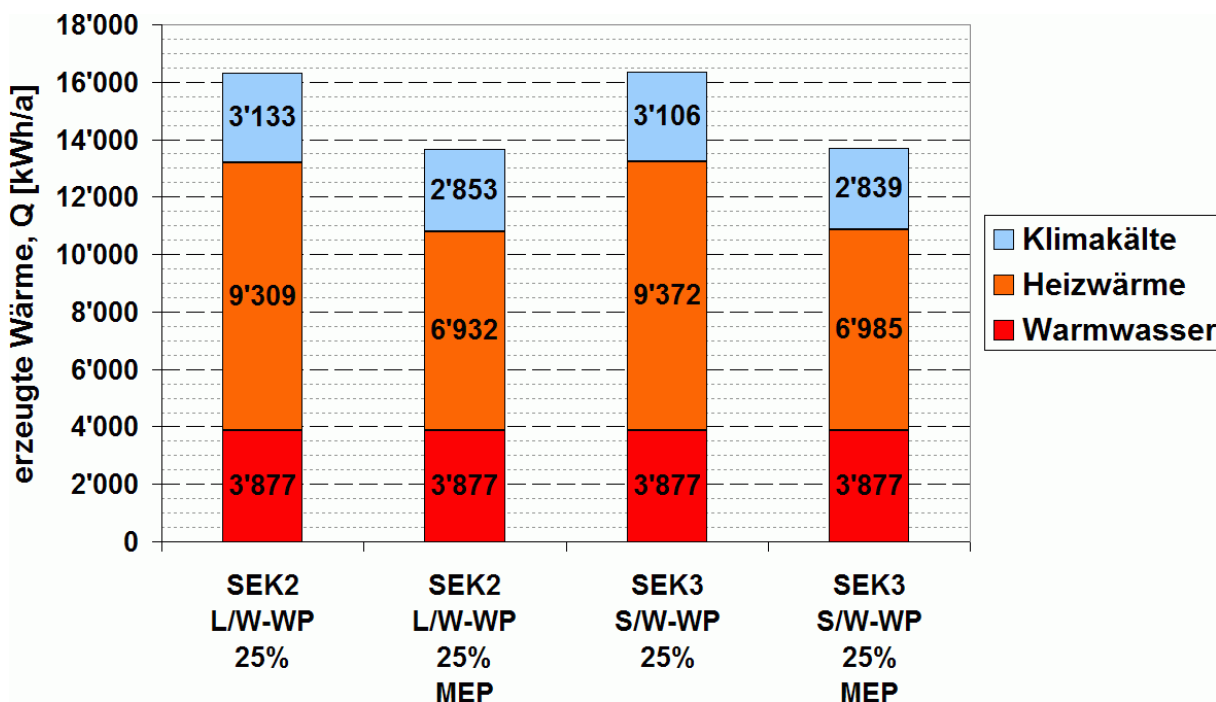


Abb. 27: Vergleich der erzeugten Wärme für die Systemvarianten SEK2

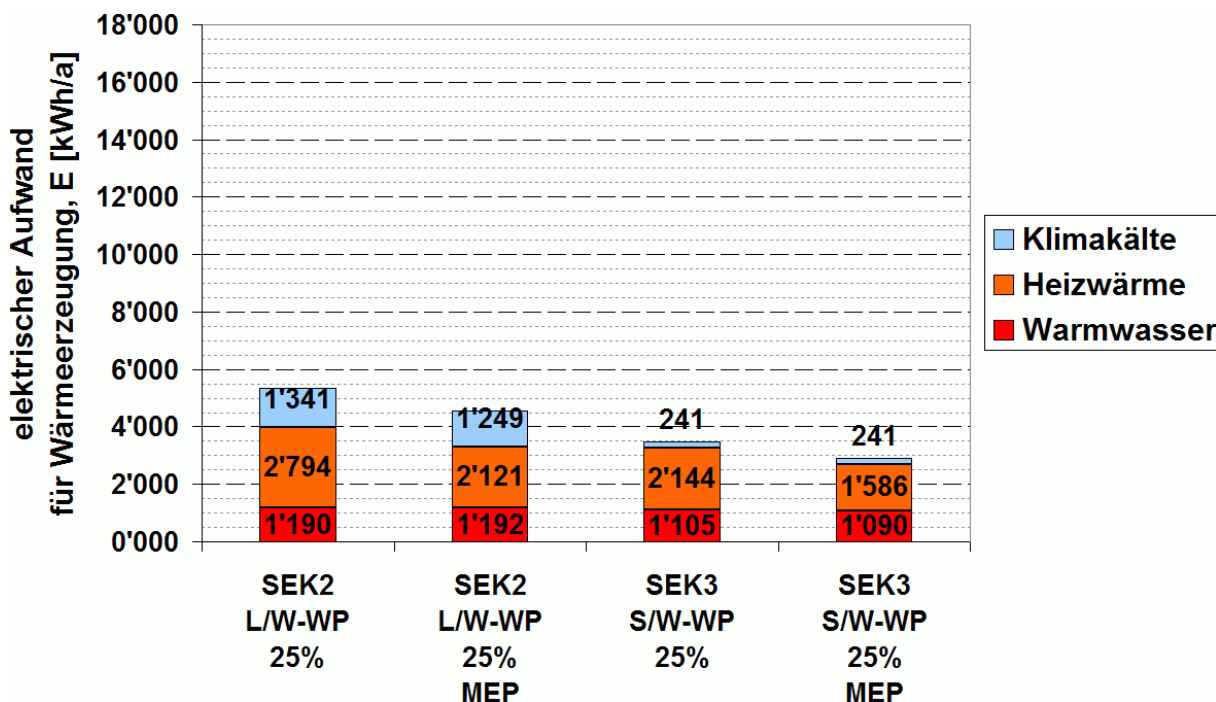


Abb. 28: Vergleich der aufgewendeten elektrischen Energie für die Systemvarianten SEK2

Der Vergleich des elektrischen Aufwandes für die Wärmeerzeugung, dargestellt in Abb. 28, zeigt, dass sich auch hierin die bessere Gebäudehülle mit einem reduzierten Aufwand für den Heizwärmebezug und den aktiven Kühlbetrieb widerspiegelt. Für das System SEK2 bedeutet das eine Reduktion des elektrischen Aufwandes für Heizen, Warmwasser und Kühlen um 14% von insgesamt 5'325 kWh/a auf 4'562 kWh/a. Der elektrische Aufwand für die Varianten SEK3 liegt deutlich niedriger und reduziert sich von 3'490 kWh/a auf 2'917 kWh/a. Der elektrische Aufwand für den Kühlbetrieb liegt bei beiden SEK3-Varianten mit 241 kWh/a auf einem deutlich geringeren Niveau als bei den SEK2-Varianten.

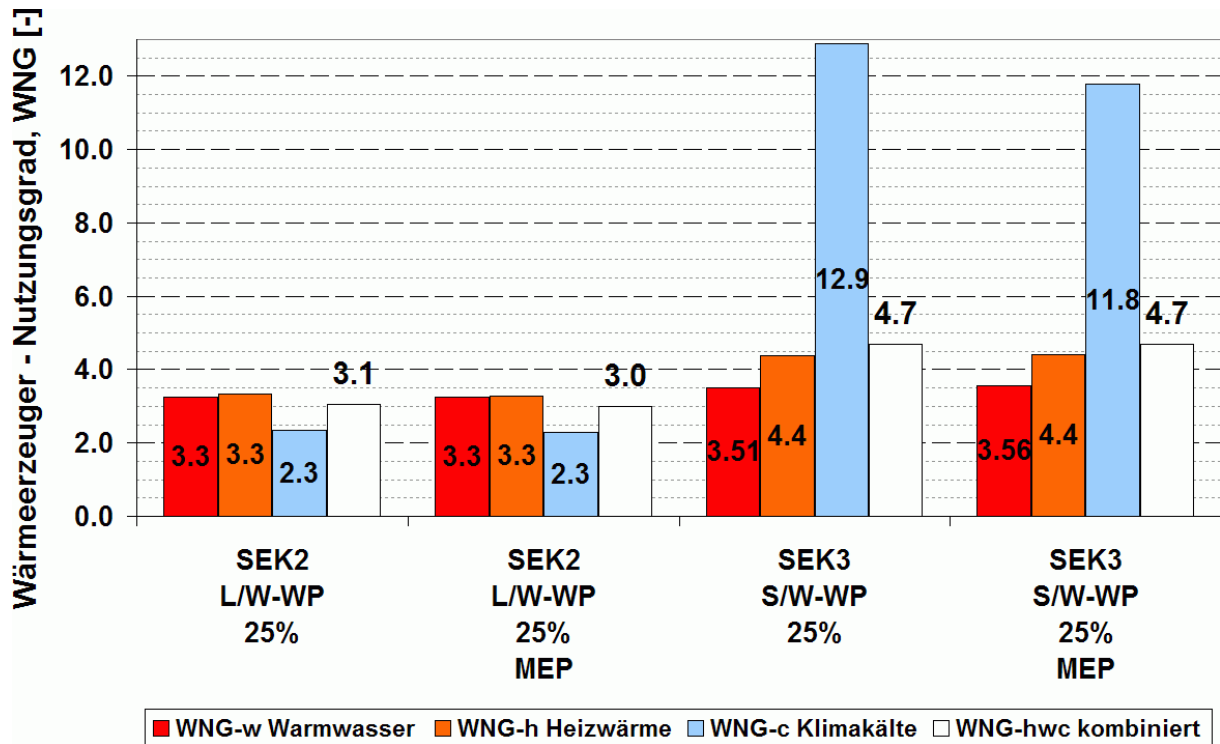


Abb. 29: Vergleich der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrade der Funktionen Heizen, Warmwasser, Kühlen und kombiniert für die Systemvarianten SEK1, SEK2 und SEK3

Der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad (Abb. 29) wird in allen Varianten nur gering von der Wahl des Gebäude-Standards beeinflusst. Für das System SEK2 mit aktivem Wärmepumpenbetrieb für alle drei Nutzfunktionen (hwc) sinkt der kombinierte Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad leicht von 3.1 auf 3.0. Für das System SEK3 steigt der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad für Warmwasser von 3.51 auf 3.56, für Klimakälte sinkt er von 12.9 auf 11.8, insgesamt bleibt er mit 4.7 konstant. Auf die Hintergründe dieses Effektes für System SEK3 wird in Kapitel 3.5 detailliert eingegangen.

3.3.3. Fazit

Mit den beiden Gebäudevarianten nach Standard Minergie® und Minergie-P® wird eine nahezu identische thermische Behaglichkeit erreicht. Die bessere Dämmung der Gebäudehülle führt zu einer Reduktion des Heizwärmebezuges um etwa 25%. Der Klimakältebezug reduziert sich mit rund 9% etwas weniger. Die Reduktion des Klimakältebezuges durch die bessere Gebäudehülle fällt bei aktiver Kälteerzeugung mit Aussenluft-Wärmepumpe stärker ins Gewicht. Allerdings liegt der gesamte elektrische Energiebezug bei einer Erdwärmesonden-Wärmepumpen-Anlage um rund 35% niedriger.

3.4. Wirkung der passiven Kühlung

Die grundsätzlichen Fragen, welche Wirkung die Kühlung in Niedrigenergie-Wohngebäuden hat, und welcher Aufwand dafür erforderlich ist, soll mit der Gegenüberstellung zweier Varianten erfolgen. Dazu wird das System SEK3 S/W-WP mit respektive ohne passive Kühlung einmal auf ein Minergie® Gebäude mit starker Verschattung (75%) und einmal auf ein Minergie-P® Gebäude mit geringer Verschattung (25%) angewendet.

3.4.1. Welche thermische Behaglichkeit wird erreicht?

Über das gesamte Jahr betrachtet erreichen alle in Abb. 30 dargestellten Varianten eine gute thermische Behaglichkeit gemessen an der operativen Raumtemperatur mit einem maximalen Anteil der Zeit in Kategorie IV von 7% für die Variante Minergie-P® Gebäude (MEP) mit geringer Verschattung (25%) und ohne Raumkühlung (ohne C).

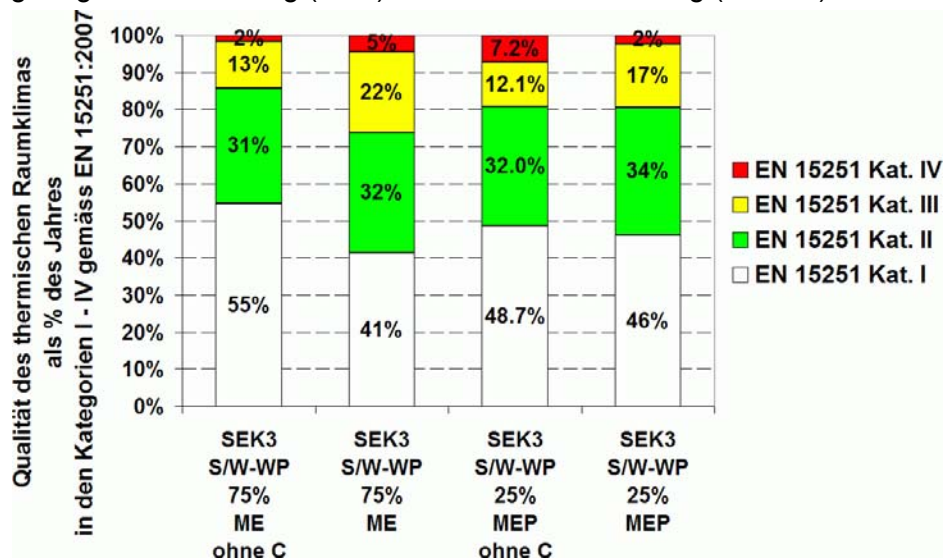


Abb. 30: Klassifizierung des thermischen Raumklimas für das gesamte Jahr

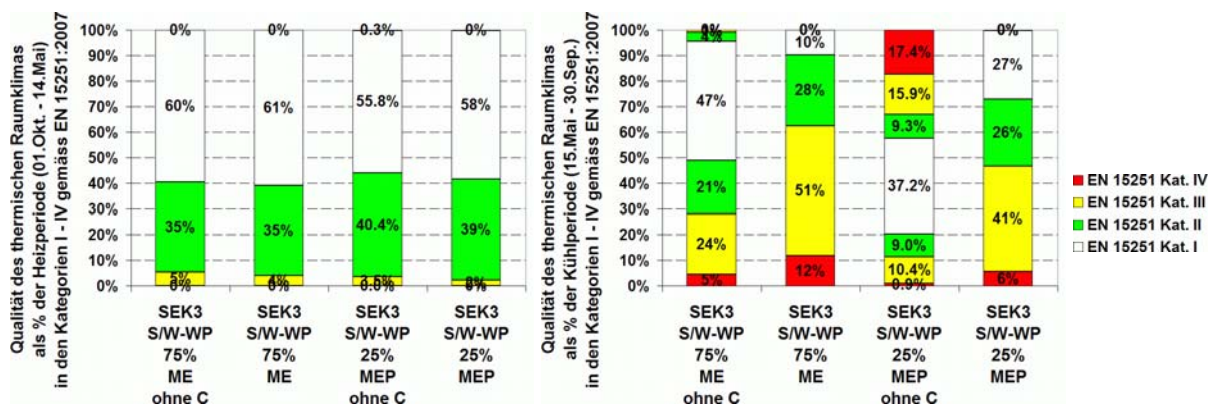


Abb. 31: Klassifizierung des thermischen Raumklimas für die Winterperiode (01. Okt. – 14. Mai links) und die Sommerperiode (15. Mai – 30. Sep. rechts)

Die Differenzierung nach Winterperiode (Abb. 31 links) und Sommerperiode (Abb. 31 rechts) zeigt für die Winterperiode ein sehr einheitliches Bild für alle Varianten mit zwischen 95% und 97% der Zeit innerhalb Kategorie II gemäss EN 15251. Für die Sommerperiode zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede. Ein massives Gebäude nach Minergie®, wie das verwendete Referenzgebäude, erreicht eine gute thermische Behaglichkeit bei einer intensiven Verschattung (75%) auch ohne zusätzliche Raumkühlung (ohne C). Die operativen Raumtemperaturen liegen zu 95% der Sommerperiode innerhalb des Behaglichkeitsbereichs nach Kategorie III. Bei einer zusätzlichen Raumkühlung erreichen die

Raumtemperaturen den unteren Rand des Behaglichkeitsbereiches. In einem Gebäude mit geringer Verschattung (25%) ohne Raumkühlung (ohne C) allerdings wird zu 17% der Sommerperiode die obere Grenze der Kategorie III von 27 °C überschritten. Mit der zusätzlichen, in diesem Fall passiven, Kühlfunktion kann auch bei weniger konsequenter und intensiver Verschattung das Raumklima im behaglichen Bereich gehalten werden.

3.4.2. Wie hoch ist der Aufwand und welche Effizienz kann erreicht werden?

Die gesamte erzeugte Wärme für Heizung und Warmwasserbereitung, ohne Klimakälte, beträgt für das Minergie® Gebäude 13'294 kWh/a, für das Minergie-P® Gebäude 10'862 kWh/a. Durch die Raumkühlung erhöht sich die gesamte erzeugte Wärme für das Minergie® Gebäude mit starker Verschattung (75%) auf 15'420 kWh/a, wobei der Heizwärmebezug um 77 kWh/a oder 1% erhöht wird und zusätzlich 2'049 kWh/a Klimakälte erzeugt werden. Für das Minergie-P® Gebäude mit geringer Verschattung (25%) erhöht sich die gesamte erzeugte Wärme auf 13'701 kWh/a, wobei der Heizwärmebezug um 67 kWh/a oder 1% steigt und zusätzlich 2'839 kWh/a Klimakälte erzeugt werden.

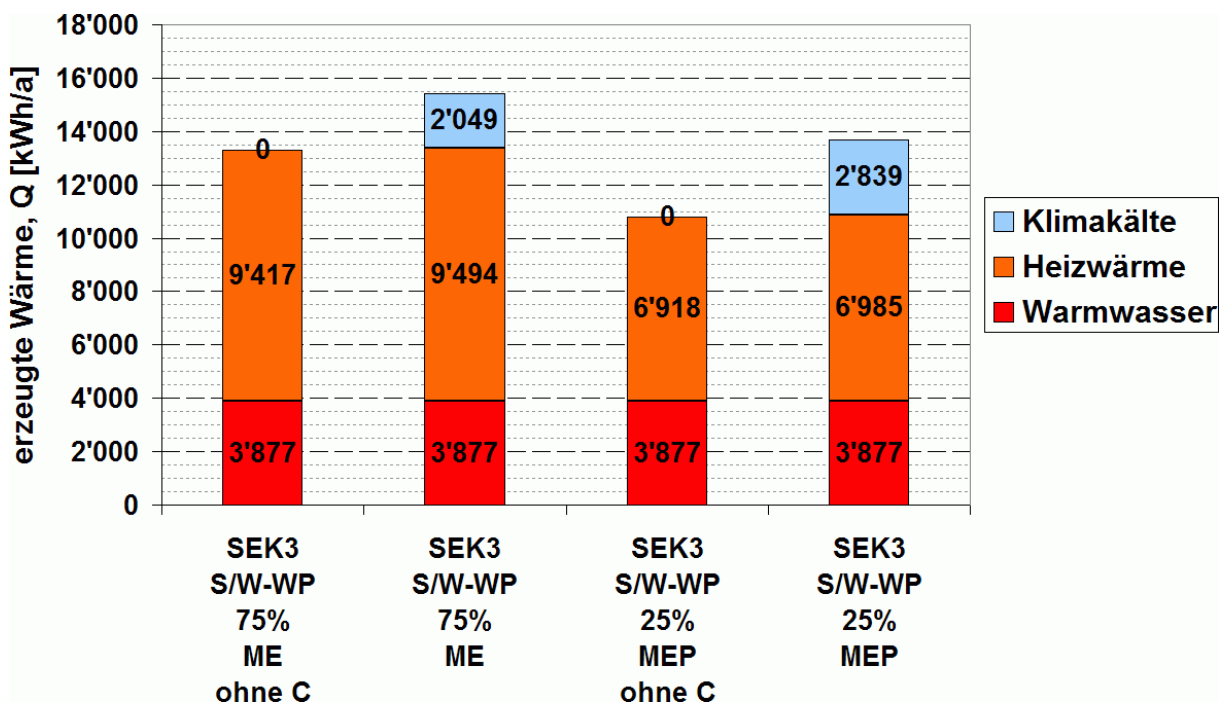


Abb. 32: Vergleich der erzeugten Wärme für die Systemvarianten SEK2

Der gesamte elektrische Aufwand steigt bei Verwendung des Systems SEK3 S/W-WP mit passiver Kühlung durch die zusätzliche Raumkühlung für das Minergie® Gebäude um 207 kWh/a (6%) von 3'324 kWh/a auf 3'531 kWh/a und für das Minergie-P® Gebäude um 191 kWh/a (7%) von 2'726 kWh/a auf 2'917 kWh/a. Interessant zu beobachten ist, dass der Heizwärmebezug und -aufwand um knapp 1% steigen, aber der elektrische Aufwand zur Warmwasserbereitung um 49 kWh/a (4%) für das Minergie® Gebäude und 58 kWh/a (5%) für das Minergie-P® Gebäude sinkt. Dieser Effekt zeigt sich auch in den Wärmeerzeuger-Nutzungsgraden, dargestellt in Abb. 34, mit gleichbleibenden Nutzungsgraden für den Heizbetrieb von 4.4 und steigenden Nutzungsgraden im Warmwasser-Betrieb mit aktivierter Kühlfunktion. Für das Minergie® Gebäude mit starker Verschattung (75%) steigt der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad im Warmwasserbetrieb um 0.15 oder 5% bei einem Kühl-Heiz-Wärmeverhältnis von 15% von Wärmeabfuhr in die Erdwärmesonde für Klimakälte zu Wärmeerzeugung aus der Erdwärmesonde für Heizen und Warmwasser. Für das Minergie-P® Gebäude mit geringer Verschattung steigt der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad im Warmwasserbetrieb um 0.18 oder 5% bei einem Kühl-Heiz-Wärmeverhältnis von 26%.

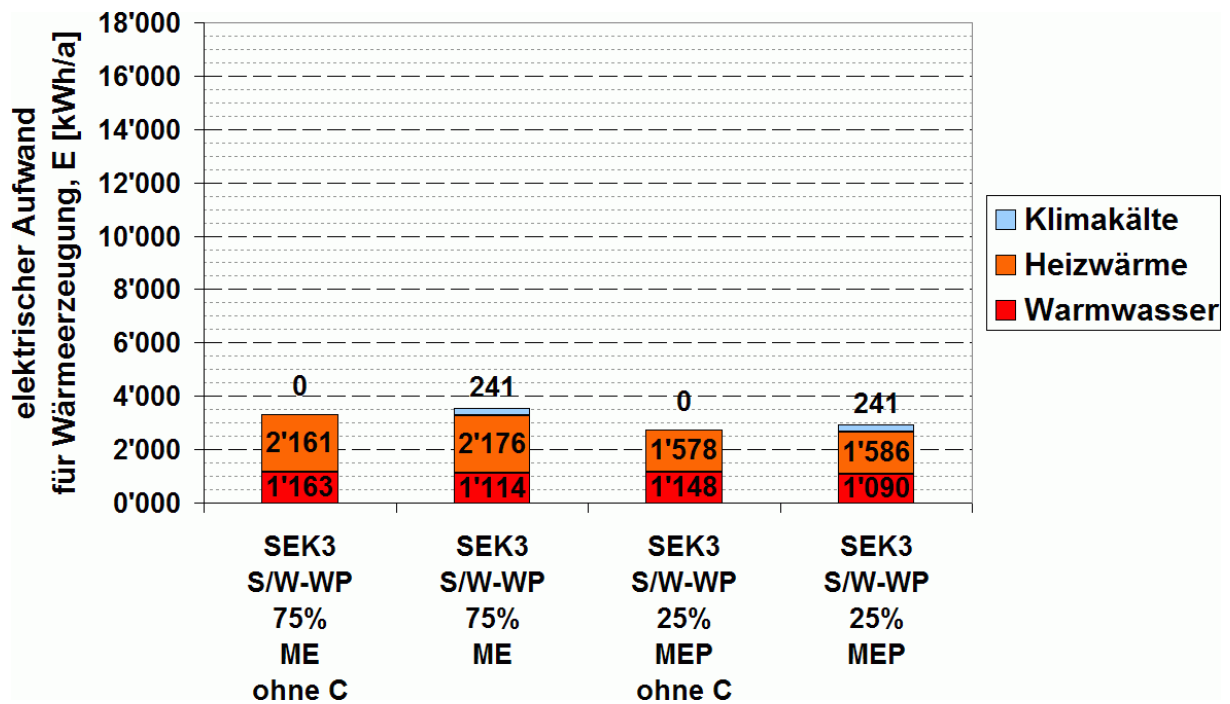


Abb. 33: Vergleich der aufgewendeten elektrischen Energie für die Systemvarianten SEK2

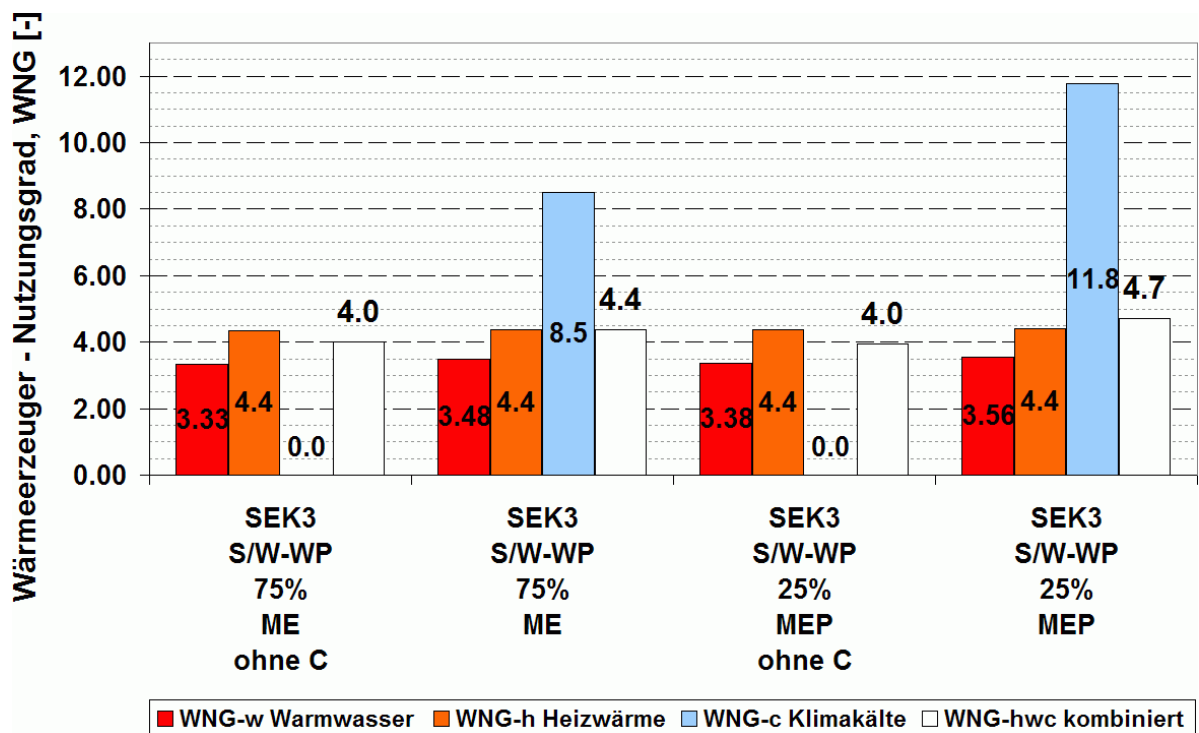


Abb. 34: Vergleich der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrade der Funktionen Heizen, Warmwasser, Kühlen und kombiniert für die Systemvarianten SEK1, SEK2 und SEK3

3.4.3. Fazit

Die passive Kühlung mit Erdwärmesonden steigert die thermische Behaglichkeit in der Kühlperiode sowohl bei einer starken, als insbesondere bei einer nicht konsequenten Verschattung. Der zusätzliche elektrische Aufwand für die Behaglichkeitssteigerung in der Kühlperiode beträgt 6-7% für eine mittlere Effizienz im passiven Kühlbetrieb. Bei einem gut eingestellten System steigt der Heizenergiebezug minimal um 1%, wohingegen der Energiebezug für Warmwasserbereitung um rund 5% sinkt.

3.5. Einfluss der passiven Kühlung auf die Erdwärmesonde als Wärmequelle

Für das System SEK3 S/W-WP soll detailliert untersucht werden, welchen Einfluss der Wärmeeintrag in die Erdwärmesonde im passiven Kühlbetrieb auf die Eigenschaften der Erdwärmesonde als Wärmequelle im Warmwasserbetrieb und im Heizbetrieb hat.

Im passiven Kühlbetrieb wird die überschüssige Raumwärme von der Fussbodenheizung aufgenommen und über einen Wärmetauscher an den Erdwärmesondenkreis abgegeben. Mit dem Eintrag der Wärme in das Erdreich besteht im Gegensatz zur Aussenluft die Möglichkeit zur Zwischenspeicherung der Wärme, wodurch bei Wärmeentzug im Heiz- oder Warmwasserbetrieb günstigere Bedingungen für den Wärmepumpenbetrieb durch höhere Quellentemperaturen existieren können.

Zur Evaluation des Einflusses wird das System SEK3 S/W-WP mit passivem Kühlbetrieb auf ein Minergie® Gebäude mit starker (75%), mittlerer (50%) und geringer (25%) Verschattung, ein Minergie-P® Gebäude mit geringer Verschattung (25%) und als Referenz auf das Minergie® Gebäude mit starker Verschattung ohne Kühlung angewendet. Die Regelung der Wärmepumpe und des Kühlbetriebes ist für alle Varianten identisch, einzig für die Minergie-P® Variante ist die Heizkurve dem Bedarf angepasst leicht abgesenkt. Die Kühlkurve ist nicht dem Bedarf angepasst, da dieser vorwiegend durch das Nutzerverhalten bedingt ist und nicht von durch die Gebäudehülle vorgegeben.

3.5.1. Welche thermische Behaglichkeit wird erreicht?

Für alle Varianten kann über das gesamte Jahr betrachtet ein sehr gutes thermisches Raumklima, wie in Abb. 35 dargestellt, erreicht werden. Dabei ist der Unterschied in der Winterperiode gering mit Abweichungen zwischen den Varianten je Klasse im Bereich von 0% bis 4% (Abb. 36 links). In der Sommerperiode (Abb. 36 rechts) zeigt die Variante ohne Kühlung (ohne C) die höchsten Raumtemperaturen mit 47% der Zeit in Kategorie I und 4% oberhalb, auch bei starker Verschattung (75%). Direkt daneben weist die Variante mit starker Verschattung (75%) und aktiviertem Kühlbetrieb die niedrigsten Raumtemperaturen auf, mit nur 10% der Zeit in Kategorie I und dem mit 79% grössten Anteil der Zeit in Kategorie II und III unterhalb Kategorie I. In den weiteren Varianten steigen die Raumtemperaturen mit geringerer Verschattung leicht an.

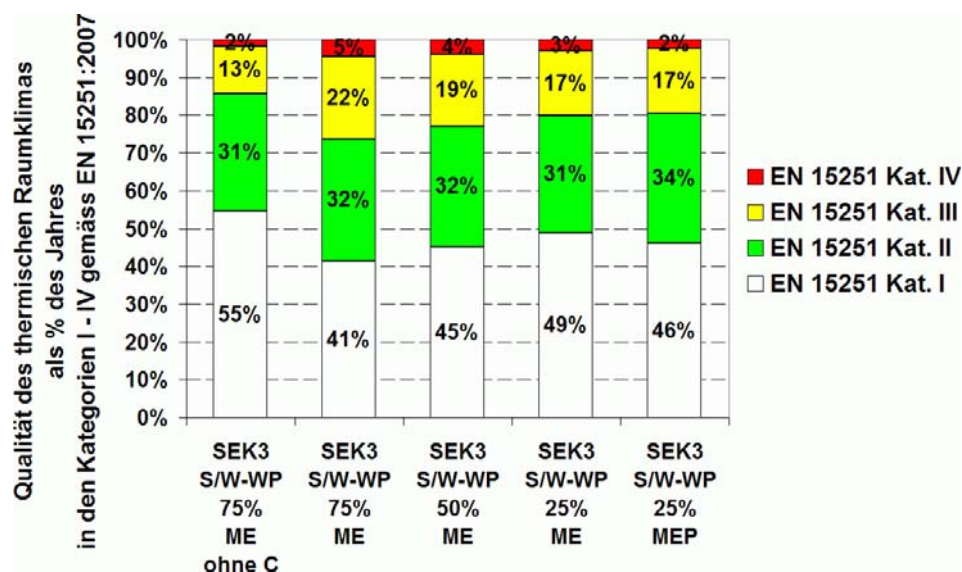


Abb. 35: Klassifizierung des thermischen Raumklimas für das gesamte Jahr

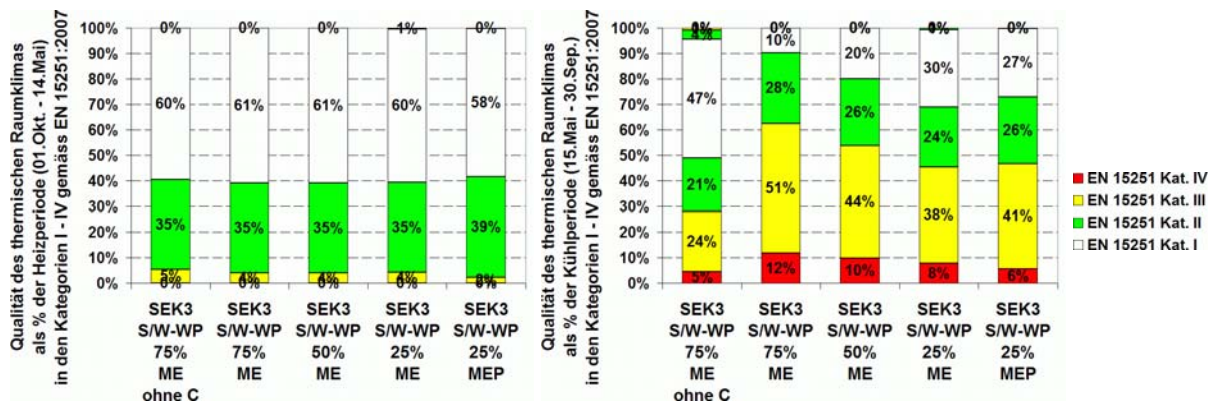


Abb. 36: Klassifizierung des thermischen Raumklimas für die Winterperiode (01. Okt. – 14. Mai links) und die Sommerperiode (15. Mai – 30. Sep. rechts)

3.5.2. Wie hoch ist der Aufwand und welche Effizienz kann erreicht werden?

Die erzeugte Wärme für Klimakälte, Heizwärme und Warmwasser ist in Abb. 37 dargestellt. Die erzeugte Wärme für Heizwärme der Referenz-Variante ohne Raumkühlung beträgt 9'417 kWh/a. Mit der zusätzlichen Raumkühlung bei gleichbleibendem Gebäude, System und Regelung erhöht sich der Betrag für Heizwärme geringfügig um 77 kWh/a oder knapp 1%. In den weiteren Varianten sinkt der Heizwärmebezug für das Minergie® Gebäude mit abnehmender Verschattung leicht auf minimal 9'372 kWh/a. Das Minergie-P® Gebäude erreicht dank der besseren Gebäudehülle eine Reduktion um 26% auf 6'985 kWh/a.

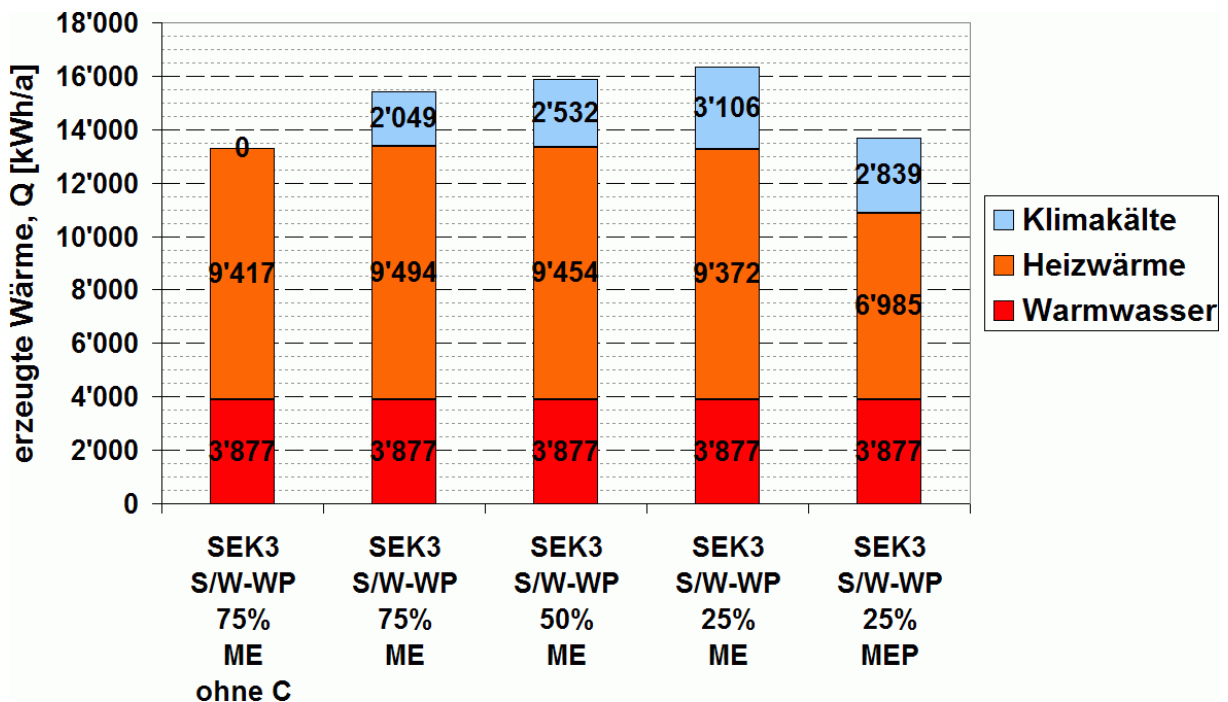


Abb. 37: Vergleich der erzeugten Wärme für die Systemvarianten SEK2

Die erzeugte Wärme für Raumkühlung beträgt bei starker Verschattung (75%) 2'049 kWh/a oder 15% der erzeugten Wärme für Heizung und Warmwasser, bei mittlerer Verschattung (50%) 2'532 kWh/a oder 19% der erzeugten Wärme und bei geringer Verschattung 3'106 kWh/a oder 23% der erzeugten Wärme. Für das Minergie-P® Gebäude mit geringer Verschattung (25%) sinkt sowohl der Heizwärmebezug auf 6'985 kWh/a als auch der Klimakältebezug auf 2'839 kWh/a, wobei der Anteil der Klimakälte an der erzeugten Wärme auf 26% steigt.

Die erzeugte Wärme für Warmwasser ist in allen Varianten konstant mit 3'877 kWh/a.

Der elektrische Aufwand zur Erzeugung der Heizwärme verhält sich proportional zur erzeugten Wärme. Die aufgewendete elektrische Energie zur Wärmeerzeugung für Klimakälte ist mit 241 kWh/a konstant für alle Varianten mit passiver Kühlung. Der elektrische Aufwand zur Warmwasserbereitung sinkt von der Variante ohne Kühlung mit 1'163 kWh/a kontinuierlich mit geringerer Verschattung bzw. mit steigendem Verhältnis von abgeführter Wärme im Kühlbetrieb zu erzeugter Wärme im Warmwasser- und Heizbetrieb auf bis zu 1'090 kWh/a. Die Differenz beträgt 73 kWh/a oder 6%.

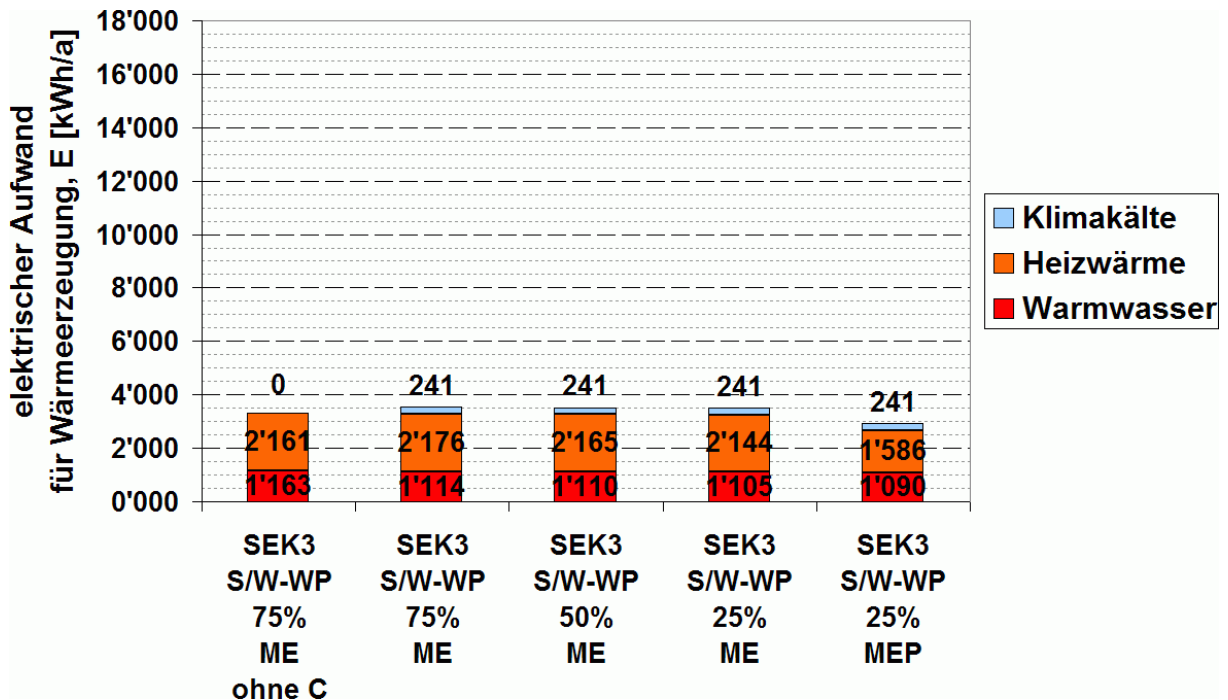


Abb. 38: Vergleich der aufgewendeten elektrischen Energie für die Systemvarianten SEK2

Der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad für Heizwärme bleibt über alle Varianten konstant bei 4.4, unabhängig von der im Kühlbetrieb abgeführten Wärme und der Variation des Wärmegewinns durch die Verschattung.

Im passiven Kühlbetrieb ist der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad nur abhängig von der abgeführten Wärme, da der Aufwand zum Betrieb der Umwälzpumpen allein abhängig von der Betriebsdauer ist und damit gleichbleibend. Die abgeführte Wärme im Kühlbetrieb stellt sich wiederum durch den Wärmeeintrag in den Raum und die daraus resultierenden Temperaturen im Raum passiv ein. Der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad liegt zwischen 8.5 für die Variante mit der geringsten Kühlenergie und 12.9 für die Variante mit der grössten abgeführten Wärmemenge.

Der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad im Warmwasserbetrieb steigt für die Minergie® Varianten von 3.33 ohne Kühlbetrieb mit zunehmender abgeführter Wärme im Kühlbetrieb bis zu 3.51 für die Variante mit geringer Verschattung (25%). Die Minergie-P® Variante zeigt weiterhin, dass nicht die absolute abgeführte Wärme relevant ist, sondern das Kälte/Wärme-Verhältnis, also das Verhältnis von der aus dem Raum abgeführten und in die Erdwärmesonde eingetragenen Wärme im Kühlbetrieb zu der erzeugten Wärme durch Wärmeentzug aus der Erdwärmesonde für Heizung und Warmwasser (siehe Tab. 6).

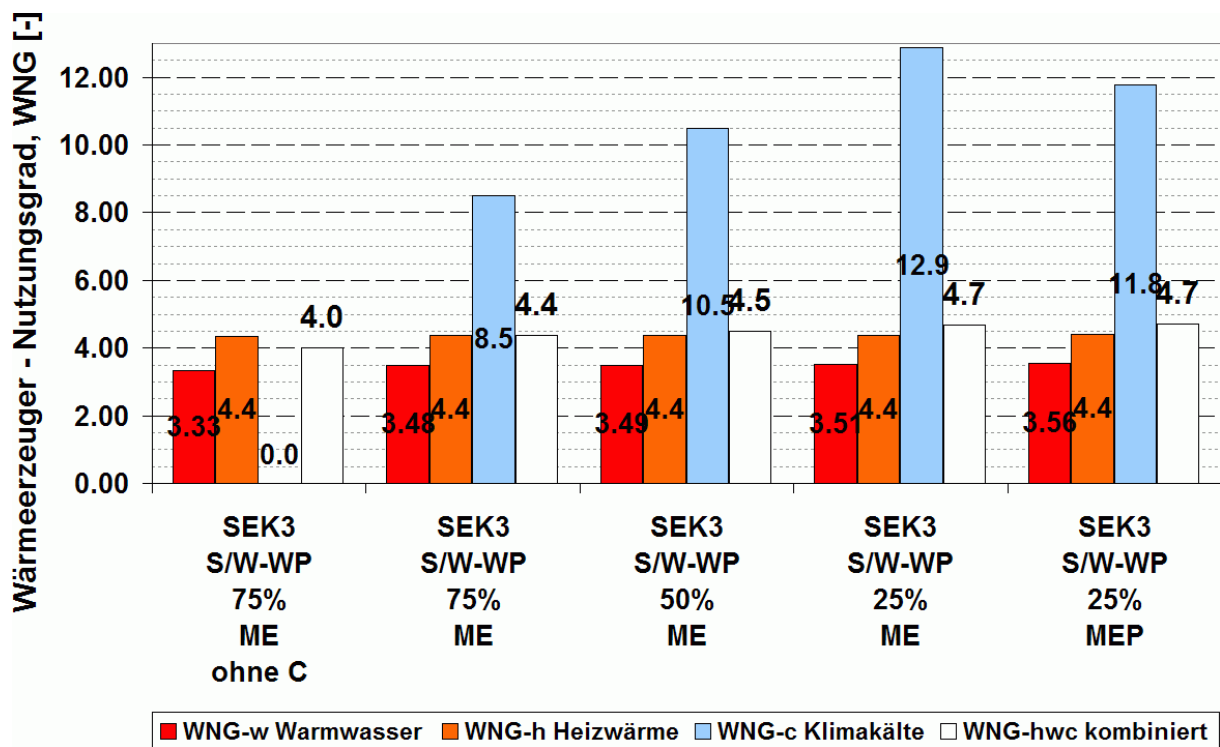


Abb. 39: Vergleich der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrade der Funktionen Heizen, Warmwasser, Kühlen und kombiniert für die Systemvarianten SEK1, SEK2 und SEK3

	SEK3 S/W-WP 75% ME ohne C	SEK3 S/W-WP 75% ME	SEK3 S/W-WP 50% ME	SEK3 S/W-WP 25% ME	SEK3 S/W-WP 25% MEP
erzeugte Klimakälte	0 kWh/a	2'049 kWh/a	2'532 kWh/a	3'106 kWh/a	2'839 kWh/a
erzeugte Heizwärme	9'417 kWh/a	9'494 kWh/a	9'454 kWh/a	9'372 kWh/a	6'985 kWh/a
erzeugtes Warmwasser	3'877 kWh/a	3'877 kWh/a	3'877 kWh/a	3'877 kWh/a	3'877 kWh/a
Kälte/Wärme-Verhältnis	0%	15%	19%	23%	26%
WNG Warmwasser	3.3	3.5	3.5	3.5	3.6

Tab. 6: Korrelation von erzeugter Wärme und Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad im Warmwasserbetrieb

3.5.3. Fazit

Die Verwendung der passiven Kühlung mit Erdwärmesonde steigert den Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad im Warmwasserbetrieb von 3.3 auf bis zu 3.6 bei ansonsten identischen Bedingungen. Dabei steigt das Kälte/Wärme-Verhältnis von 0% in der Variante ohne Kühlbetrieb bis auf 26% bei intensiver Kühlnutzung im Minergie-P Gebäude. Der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad im Heizbetrieb wird vom passiven Kühlbetrieb mit einer Steigerung um maximal 0.04 Arbeitszahlpunkte nicht merklich beeinflusst.

4. Jahresnutzungsgrad-Rechenmethode für die passive Kühlung mit Erdwärmesonden

Die passive Kühlung mit Erdwärmesonden nutzt das im Vergleich zur Raumtemperatur natürlich niedrigere Temperaturniveau des Erdreichs zur Kühlung des Gebäudes. Dabei werden bei dem betrachteten System SEK3 S/W-WP (siehe Abb. 40) weitestgehend schon für den Heiz- und Warmwasserbetrieb bestehende Installationen und Bauteile genutzt. Zur Erschliessung des niedrigen Temperaturniveaus im Erdreich wird die Erdwärmesonde als Wärmesenke verwendet, welche im Heiz- und Warmwasserbetrieb schon als Wärmequelle dient. Als Wärmeübergabesystem zum Raum hin dient in beiden Fällen die Fussbodenheizung. Alternativ kann die Wärmeübergabe zum Raum hin auch mit Konvektoren erfolgen. Als zusätzliche Bauteile werden, in Abb. 40 grau hinterlegt, ein Wärmetauscher, Ventile und die Regelfunktionen benötigt.

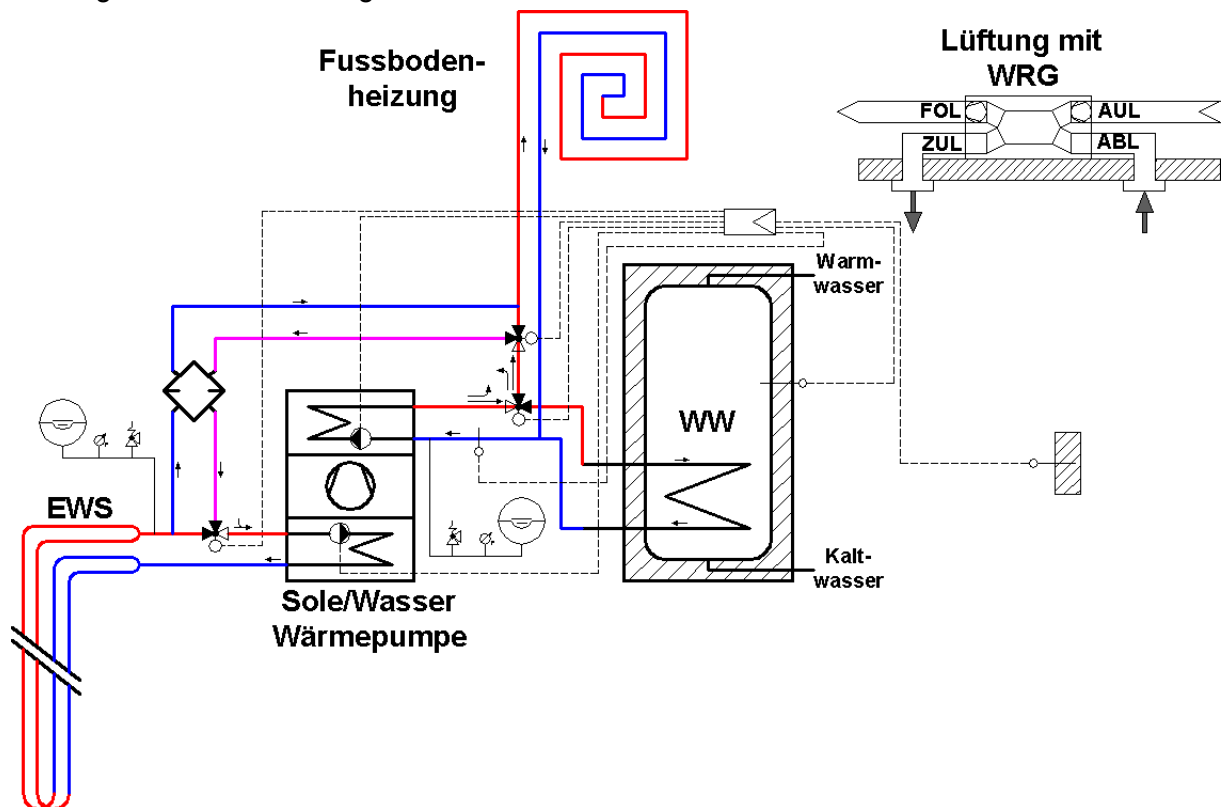


Abb. 40: Aufbau der Standard – Schaltung SEK3 Sole/Wasser-Wärmepumpe mit passiver Kühlfunktion

In den meisten Wohnbauten ist eine aktive Kühlung nicht erforderlich und bisher keine üblicherweise eingesetzte Technik. Trotzdem gibt es, auch wegen der allgemein zunehmenden Klimatisierung in Fahrzeugen und an Arbeitsstätten, eine zunehmende Nachfrage nach Raumkühlung in Wohnbauten. Gemäss den Anforderungen im schweizerischen Normenwerk (MuKE 2008 [14] und SIA 382/1:2007 [8]) darf eine Kühlung jedoch nur realisiert werden, wenn bauliche Anforderungen an die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle, Sonnenschutz und die Wärmespeicherfähigkeit der Raumumschliessungsflächen erfüllt sind. Weiterhin muss der Bedarf einer Kühlung nachgewiesen werden, entweder durch besondere Anforderungen an die Raumtemperatur, hohe innere Wärmelasten oder hohe sommerliche Raumlufttemperaturen. Ohne diesen Nachweis dürfen, bei Einhaltung der baulichen Anforderungen, nur Anlagen mit kleinem elektrischem Leistungsbedarf für Medienförderung und Aufbereitung inklusive Kühlung realisiert werden. Dieser kleine elektrische Leistungsbedarf wird für Neubauten mit 7 Watt pro Quadratmeter gekühlte Nettogeschossfläche festgelegt, für bestehende Anlagen und sanierte Anlagen mit 12 W/m².

Die Entwicklung von Rechenmethoden für den Jahresnutzungsgrad von Wärmepumpensystemen in Wohngebäuden für die Funktionen Heizen und Warmwasserbereitung machte in den letzten Jahren grosse Fortschritte. Die im BFE-Projekt "Rechenmethode für den Jahresnutzungsgrad von Wärmepumpen-Kompaktgeräten und Validierung" [15] entwickelte Rechenmethode fand mit der Norm EN 15316-4-2:2008 „Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen - Teil 4-2: Wärmeerzeugung für die Raumheizung, Wärmepumpensysteme“ [16] Einzug in die europäische Normung im Rahmen der EPBD – Energy Performance of Buildings Directive [17]. Mit der Normenreihe DIN V 18599-5 „Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung“ [18] wurde sie in Deutschland als nationale Vornorm erfolgreich umgesetzt und angewendet. Das grundlegende Verfahren, eine Temperaturklassenmethode, wird aktuell in der schweizerischen Norm SIA 384/3 „Heizungsanlagen – Anlagentechnik und Nutzungsgrad“ weiterentwickelt in die nationale Normung integriert.

Eine Integration leistungsgeregelter Wärmepumpen existiert bisher noch nicht. Teilbereiche in Form eines Prüfverfahrens für leistungsgeregelte Wärmepumpen und Klimaanlage sowie saisonale, auf einen Referenzstandort bezogene Kennzahlen werden zurzeit mit der prEN 14825 [19] erarbeitet. Für aktives Kühlen existieren in der europäischen Normung Rechenverfahren mit den Normen EN 15255 [20], EN 15265 [21] und EN 15243 [22] welche zurzeit im Rahmen der SIA 382 – Reihe für mechanisch belüftete respektive klimatisierte Gebäude in die Schweizerische Normung integriert werden. Einheitliche Rechenverfahren für die passive Kühlung mit Erdwärmesonden fehlen bisher vollständig. Ebenso kann der Einfluss der passiven Kühlung auf den Heiz- und Warmwasserbetrieb nicht in einer Rechenmethode abgebildet werden.

In diesem Kapitel sollen daher folgende Fragestellungen bearbeitet werden:

- Bestimmung des elektrischen Aufwandes für die passive Kühlung
- Einfluss der passiven Kühlung mit Erdwärmesonden auf den Heiz- und Warmwasserbetrieb
- Integration der Rechenmethode in die Nutzungsgradberechnung mit BIN-Methode

4.1. Charakteristik

Die passive Kühlung mit Erdwärmesonden ist dadurch charakterisiert, dass zwei thermisch getrennte Bereiche, der Wohnraum und das nahe Erdreich, über ein Wärmeträgermedium thermisch gekoppelt werden. Der technische Eingriff besteht dabei nur darin, dass das Wärmeträgermedium mit dem Wohnraum und dem Erdreich thermisch in Kontakt steht und zwischen beiden zirkuliert. Die Temperatur des Wärmeträgermediums und damit der Wärmefluss zwischen den beiden Bereichen wird nicht aktiv beeinflusst, sondern stellt sich aufgrund der Temperaturen in den beiden Bereichen und des Wärmeübergangs zu den Bereichen passiv ein, daher die Bezeichnung passive Kühlung. Einzig die Intensität der Koppelung kann über den Gesamt- oder einen Teilmassenstrom geregelt werden. Der Aufwand für die passive Kühlung entsteht nur durch die Energieaufnahme für den Transport des zirkulierenden Wärmeträgers. Die Nutzenergie zur Raumkühlung in Form der abgeführten Wärme ergibt sich aus den Temperaturbedingungen der beiden Bereiche Wohnraum und Erdreich sowie der Dauer der Koppelung. Auf den Kühlnutzen im Sinne der Beeinflussung der Raumtemperatur haben noch viele weitere Faktoren einen sehr relevanten Einfluss, wie z.B. Verschattung oder interne Lasten, sodass der Kühlnutzen nur in einer gesamthaften Betrachtung des Gebäudes quantifiziert werden könnte. Es besteht kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen dem Kühlnutzen und dem dafür notwendigen Aufwand. Die Berechnung der Raumwärmebilanz geht über den Rahmen dieses Rechenverfahrens hinaus. Daher kann eine Bestimmung des Nutzungsgrades der passiven Kühlung nur unter der Annahme einer vollständigen Deckung des aus der Raumbilanz bestimmten Klimakältebedarfs erfolgen. Die Berechnung des Aufwandes ist daher die relevante Ergebnisgrösse für das Rechenverfahren. Weiterhin hat, auf der Seite der

Erdwärmesonde, die passive Kühlung Einfluss auf den Heiz- und Warmwasserbetrieb, welcher im Rechenverfahren ermittelt wird.

4.2. Aufwandsberechnung für die passive Kühlung

Der Aufwand für die passive Kühlung berechnet sich als Integral der Leistungsaufnahme der eingesetzten Komponenten zur Koppelung der Wärmesenke Erdwärmesonde mit dem Wärmeübergabesystem zum Raum hin. Im betrachteten System setzt sich die gesamte elektrische Leistungsaufnahme aus den Umwälzpumpen im Fussbodenkreis und im Erdwärmesondenkreis und der Steuer- und Regeleinrichtungen zusammen.

$$E_{el,C} = \int_{t_C} P_{el,C} * dt \quad \text{Gl. 9}$$

$E_{el,C}$	elektrischer Energieaufwand im passiven Kühlbetrieb	[kWh]
$P_{el,C}$	elektrische Leistungsaufnahme im passiven Kühlbetrieb	[kW]
t_C	Laufzeit im passiven Kühlbetrieb	[h]

In den meisten Fällen kann dies zum Produkt aus Laufzeit und Leistungsaufnahme vereinfacht werden, da die Umwälzpumpen im passiven Kühlbetrieb im Normalfall sowohl durchlaufend als auch mit konstantem Massenstrom betrieben werden oder annähernd eine konstante mittlere Leistungsaufnahme angesetzt werden kann.

$$E_{el,C} = P_{el,C} * t_C \quad \text{Gl.10}$$

Der gesamte elektrische Aufwand entspricht gemäss den Bilanzgrenzen für die Definition der Nutzungsgrade in Abb. 1 dem System-Nutzungsgrad, da sowohl Wärmeerzeugung als auch Wärmeverteilung und Wärmeübergabe enthalten sind.

$$E_{el,C,SNG} = (P_{el,ctr+aux} + P_{el,Pu,BHE} + P_{el,Pu,em})_C * t_C \quad \text{Gl.11}$$

$E_{el,C,SNG}$	elektrischer Energieaufwand des System – Nutzungsgrades	[kWh]
$P_{el,ctr+aux}$	elektrische Leistungsaufnahme für Regelung und Hilfsenergie	[kW]
$P_{el,Pu,BHE}$	elektrische Leistungsaufnahme der Umwälzpumpe Erdwärmesonde	[kW]
$P_{el,Pu,em}$	elektrische Leistungsaufnahme der Umwälzpumpe Wärmeübergabesystem	[kW]

Der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad umfasst nur die Wärmeerzeugung inklusive Regelung, womit sich der elektrische Aufwand entsprechend dieser Bilanzgrenze ergibt zu:

$$E_{el,C,WNG} = (P_{el,ctr+aux} + P_{el,Pu,BHE})_C * t_C \quad \text{Gl.12}$$

$E_{el,C,WNG}$	elektrischer Energieaufwand des Wärmeerzeuger – Nutzungsgrades	[kWh]
----------------	--	-------

4.2.1. Bestimmung der Laufzeit im passiven Kühlbetrieb

Die Umschaltung zwischen Heizbetrieb und Raumkühlbetrieb erfolgt für Wohngebäude sowohl sinnvoll wie auch üblicherweise angewendet anhand einer gleitend gemittelten Aussenluft-Temperatur. Bei Temperaturen unterhalb der Heizgrenze wird der Heizbetrieb freigegeben, bei Temperaturen oberhalb der Kühlgrenze der Kühlbetrieb. Zwischen beiden Grenzwerten gibt es einen Bereich in dem weder geheizt noch gekühlt wird, die neutrale Zone. In Abb. 41 ist die für das Referenzgebäude angewandte Heiz- und Kühlcharakteristik dargestellt.

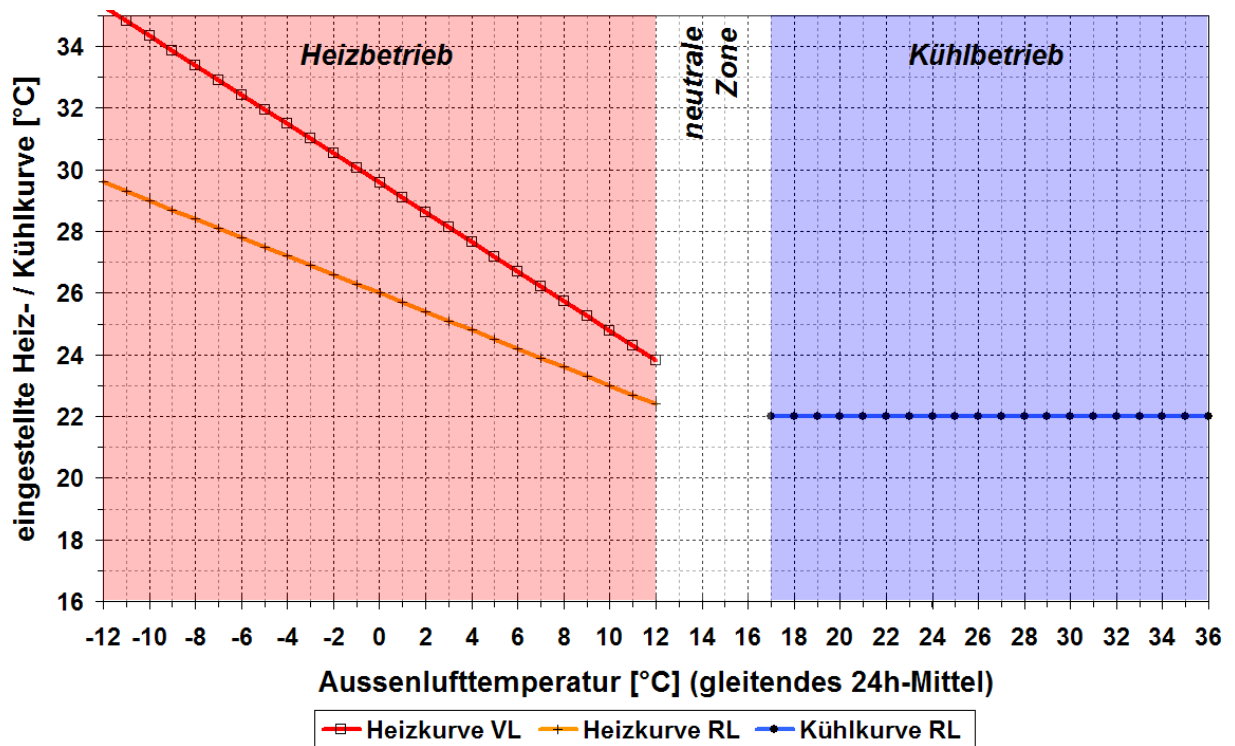


Abb. 41: Heiz- und Kühlcharakteristik für das Minergie® Referenzgebäude

Die Laufzeit im passiven Kühlbetrieb kann für Wohngebäude aus dieser Regelcharakteristik abgeleitet werden. Sie ergibt sich als Summe der Stunden, an denen die gleitend gemittelte Aussentemperatur oberhalb der Kühlgrenze liegt und kann gemäss Gl.13 berechnet werden.

$$t_C = \sum_1^n m_j * dt \quad \text{mit} \quad \begin{matrix} m_j = 1 \text{ für } \Theta_{e,avg} > \Theta_{e,li,C} \\ m_j = 0 \text{ für } \Theta_{e,avg} \leq \Theta_{e,li,C} \end{matrix} \quad \text{Gl.13}$$

t_C	Laufzeit im Kühlbetrieb	[h]
n	Anzahl Stunden im Betrachtungszeitraum (Jahr oder Monat)	[-]
dt	Zeitschritt der Betrachtung	[h]
$\Theta_{e,avg}$	Aussentemperatur - Mittelwert im Zeitschritt dt	[°C]
$\Theta_{e,li,C}$	Kühlgrenzwert der Aussentemperatur	[°C]

$$CDD = \sum_1^n (\Theta_{e,avg,d} - \Theta_{e,li,C}) * m_j \quad \text{mit} \quad \begin{matrix} m_j = 1 \text{ für } \Theta_{e,avg,d} > \Theta_{e,li,C} \\ m_j = 0 \text{ für } \Theta_{e,avg,d} \leq \Theta_{e,li,C} \end{matrix} \quad \text{Gl.14}$$

CDD	Kühlgradtage	[Kd]
n	Anzahl Tage im Jahr	[-]
$\Theta_{e,avg,d}$	Aussentemperatur - Tagesmittelwert	[°C]
$\Theta_{e,li,C}$	Kühlgrenzwert der Aussentemperatur	[°C]

Für den normalen DesignReferenceYear Klimadatenatz des Standortes „Basel-Binningen“ gemäss SIA 2028 ergeben sich exemplarisch die in Tab. 7 und Abb. 42 dargestellten Laufzeiten bei einer gleitenden Mittelungsdauer von 24 Stunden und die Kühlgradtage gemäss Gl.14 abhängig von der Kühlgrenze.

Kühlgrenze $\Theta_{e,li,C}$	17 °C	18 °C	19 °C	20 °C	21 °C	22 °C	23 °C	24 °C
Laufzeit t_C	1893 h	1683 h	1291 h	872 h	592 h	352 h	219 h	119 h
Kühlgradtage CDD	254 Kd	180 Kd	116 Kd	72 Kd	44 Kd	24 Kd	13 Kd	5 Kd

Tab. 7: Laufzeit im Kühlbetrieb in Bezug zur gleitend gemittelten Aussentemperatur für den Klimadatensatz Basel-Binningen

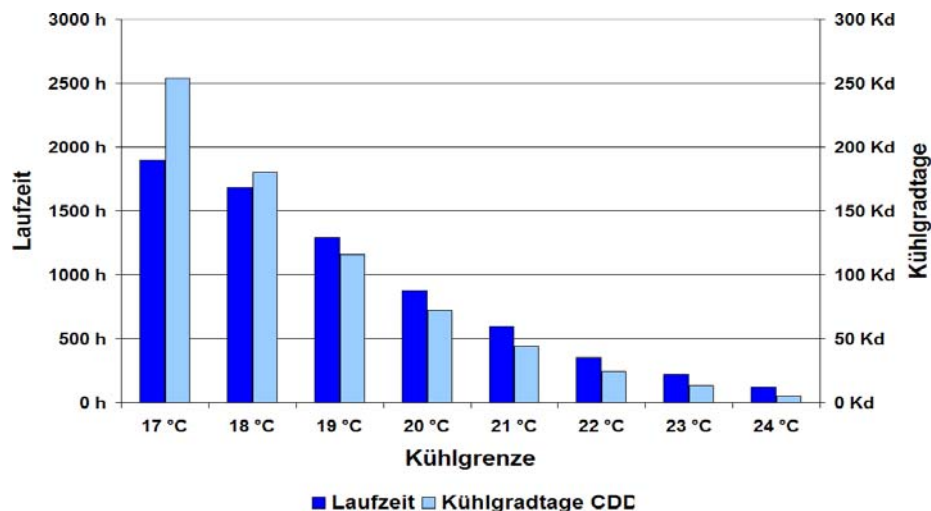


Abb. 42: Laufzeit im Kühlbetrieb in Bezug zur über 24 Stunden gleitend gemittelten Aussentemperatur für den Klimadatensatz Basel-Binningen

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.

In der Feldmessung Mehrfamilienhaus CosyPlace in Basel [3] wurden für den Sommer 2008 mit begrenztem Kühleinsatz eine Laufzeit von 748 h gemessen und für den Sommer 2009 mit intensiverter Raumkühlung eine Laufzeit von 1439 h. Die Feldmessung Einfamilienhaus Muolen [2] weist für den Sommer 2009 eine Laufzeit von 660 h aus.

4.2.2. Sensitivitätsanalyse der Komponenten-Effizienz

Für das betrachtete Minergie®-Referenzgebäude mit einem Heizwärmeleistungsbedarf von 4.5 kW werden in Tab. 8 die elektrische Leistungsaufnahme und der Energiebezug im passiven Kühlbetrieb für hohe, mittlere und geringe Effizienz gegenübergestellt. Dabei steht geringe Effizienz für wenig effiziente, aber heute noch neu eingesetzte Komponenten; mittlere Effizienz für gute Produkte; und hohe Effizienz für sehr gute, marktverfügbare Technologie. Die Koppelung von Wärmesenke und Wärmeübergabesystem erfordert im Normalfall für jeden hydraulischen Kreis eine Umwälzpumpe und zusätzlich Komponenten der Regelung und Hilfsaggregate (Regler, Stellantrieb, Sensoren und ggf. weitere Umwälzpumpen). Tab. 8 zeigt die Zusammensetzung des elektrischen Energiebezugs für

eine Laufzeit von 500 respektive 1500 Stunden. Mit hocheffizienten Komponenten kann die elektrische Leistungsaufnahme von 130 Watt für eine mittlere Effizienz leicht auf 60 Watt, also weniger als die Hälfte reduziert werden. Allerdings führen Komponenten mit geringer Effizienz oder auch eine Überdimensionierung der Komponenten (z.B. der Wärmepumpe) leicht auch zu einer deutlichen Steigerung der Leistungsaufnahme auf 210 Watt.

	Effizienz	hoch	mittel	gering
1	Umwälzpumpe Erdwärmesonde	45 Watt	100 Watt	150 Watt
2	Regelung	5 Watt	15 Watt	30 Watt
3	Umwälzpumpe Fussbodenkreis	10 Watt	15 Watt	30 Watt
4	Summe el. Leistungsaufnahme	60 Watt	130 Watt	210 Watt
5	el. Energiebezug Kappung der Temperaturspitzen (Laufzeit 500 h)	30 kWh/a	65 kWh/a	105 kWh/a
6	el. Energiebezug Dauerkühlung (Laufzeit 1500 h)	90 kWh/a	195 kWh/a	315 kWh/a
7	abgeführte Wärme für Raumkühlung bei sanfter Dauerkühlung	2500 kWh/a	2500 kWh/a	2500 kWh/a
8	Wärmeerzeuger- Nutzungsgrad	33.3	14.5	9.3
9	System- Nutzungsgrad	27.8	12.8	7.9

Tab. 8: Variation und Sensitivität von elektrischem Aufwandes und Effizienz im passiven Kühlbetrieb

Aus dieser recht grossen Varianz der elektrischen Leistungsaufnahme ergibt sich eine ebenso grosse Bandbreite des Wärmeerzeuger- respektive System-Nutzungsgrades. Eine angenommene sanfte Dauerkühlung mit dem passiven Kühlsystem, angelehnt an die Systemanalyse in Kapitel 3.4, führt zu einer Laufzeit von rund 1500 Stunden pro Jahr und einer Wärmeabfuhr aus dem Raum von etwa 2500 kWh/a. Aus der gleichzeitigen Variation der Effizienz aller Komponenten, entsprechend Zeile 4 in Tab. 8, resultieren die in Abb. 43 links dargestellten Wärmeerzeuger-Nutzungsgrade zwischen 9.3 für eine geringe Effizienz bis hin zu 33.3 für eine hohe Effizienz aller Komponenten sowie die in Abb. 43 rechts dargestellten System-Nutzungsgrade mit Werten zwischen 7.9 und 27.8.

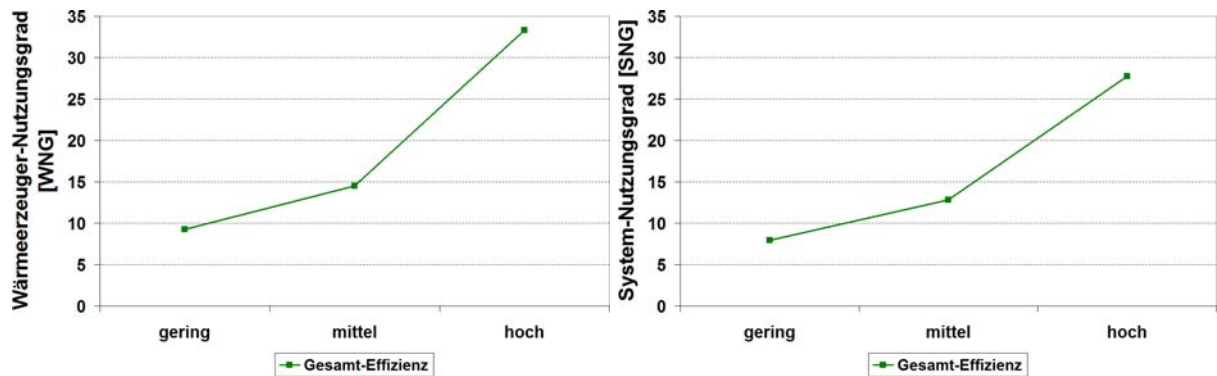


Abb. 43: Sensitivitätsanalyse des Nutzungsgrades passive Kühlung auf die Effizienz der Komponenten, links Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad, rechts System-Nutzungsgrad

Zur Bewertung der Sensitivität der einzelnen Komponenten wird in den Grafiken Abb. 44 und Abb. 45 entsprechend den Angaben in Tab. 8 die Effizienz der jeweils bezeichneten Komponente variiert und für die weiteren Komponenten eine mittlere Effizienz angenommen. Abb. 44 zeigt in der linken Grafik die Sensitivität des System-Nutzungsgrades auf die Effizienz der Umwälzpumpe im Fussbodenkreis. Umwälzpumpen für Heizkreise sind, auch aufgrund der Effizienzbemühungen der letzten Jahre, immer häufiger hocheffiziente elektronisch kommutierte Gleichstrom Synchronmotor Umwälzpumpen. Die mittlere Leistungsaufnahme der Heizkreis-Umwälzpumpe variiert daher nach praktischen Erfahrungen schon auf recht geringem Niveau zwischen 10 Watt und 30 Watt für das Referenz-Einfamilienhaus. Das wirkt sich auf den System-Nutzungsgrad mit einer verhältnismässig geringen Variation zwischen 11.5 und 13.3 aus. Der System-Nutzungsgrad zeigt eine ähnlich geringe Sensitivität auf die Effizienz des Regelungsaufwandes, dargestellt in Abb. 44 rechts, wie auf die Effizienz der Fussbodenkreis-Umwälzpumpe mit einer Variation desselben zwischen 11.5 und 13.9.

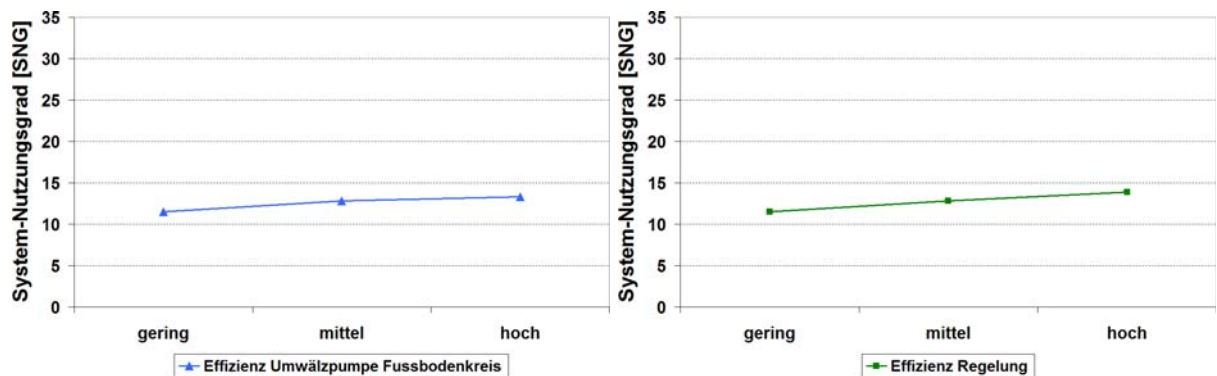


Abb. 44: Sensitivitätsanalyse des System-Nutzungsgrades passive Kühlung auf die Effizienz der Umwälzpumpe Fussbodenkreis (links) und Regelungsaufwand (rechts)

Eine sehr starke Sensitivität zeigt der System-Nutzungsgrad in Abb. 45 links auf die Effizienz der Umwälzpumpe im Erdwärmesondenkreis. Einerseits können der Druckverlust und damit der elektrische Leistungsbedarf abhängig von der Auslegung variieren. Andererseits kommen auch deshalb eher grosszügig bis überdimensionierte Umwälzpumpen zum Einsatz. Die grosse Streubreite in der elektrischen Leistungsaufnahme und der im Vergleich mit den anderen Komponenten höchste Leistungsbedarf der Umwälzpumpe im Erdwärmesondenkreis zeigt sich im System-Nutzungsgrad mit einer starken Sensitivität und einer resultierenden Bandbreite zwischen 9.3 als schlechtestem Wert und mit 22.2 einer mehr als verdoppelten Effizienz.

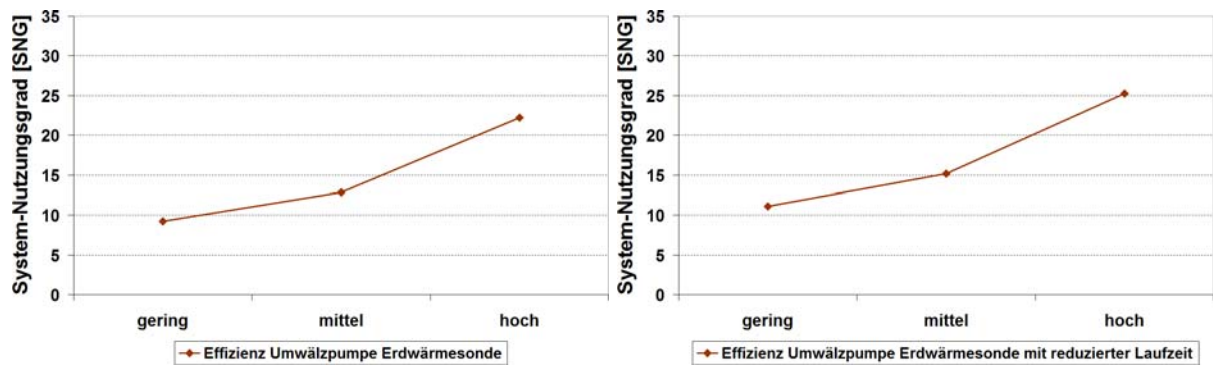


Abb. 45: Sensitivitätsanalyse des System-Nutzungsgrades passive Kühlung auf die Effizienz der Umwälzpumpe Erdwärmesonde (links) und mit zusätzlich optimierter Laufzeit dieser (rechts)

Diese grosse Bandbreite ergibt sich schon bei einem heutzutage üblichen durchgehenden Betrieb der Umwälzpumpen, sobald der passive Kühlbetrieb aktiviert ist. Betrachtet man die Erdwärmesonde als Kälteerzeuger, so kann dessen Effizienz gesteigert werden, indem die Nutzung optimiert wird auf eine möglichst grosse Wärmeleistung im Betrieb, verursacht durch einen intermittierenden Betrieb der Erdwärmesonde. Dabei werden nicht dauerhaft geringe Wärmeleistungen ins Erdreich abgeführt, sondern durch eine grössere, eingestellte Hysterese der Temperatur in der thermischen Speichermasse Fussboden ein intermittierender Betrieb provoziert und die Wärmeleistung in der Betriebsphase gesteigert. Eine angenommene Reduktion der Umwälzpumpen-Laufzeit um bis zu 20% steigert, wie in Abb. 45 rechts dargestellt, schon bei mittlerer Effizienz aller Komponenten den System-Nutzungsgrad von 12.8 auf 15.2. Selbst mit einer Umwälzpumpe geringer Effizienz im Erdwärmesondenkreis kann somit ein System-Nutzungsgrad von 11.1 erreicht werden, der maximale System-Nutzungsgrad mit hocheffizienter Erdwärmesonden-Umwälzpumpe und einer optimierten Laufzeit dieser Umwälzpumpe kann somit für die angenommenen Randbedingungen auf 25.3 gesteigert werden.

4.2.3. Fazit

Die passive Kühlung mit Erdwärmesonden ist charakterisiert durch die passive thermische Kopplung vom Wohnraum mit der natürlichen Kältequelle Erdreich. Die Berechnung des Aufwandes kann daraus folgend einfach gehalten werden als Produkt aus der bestimmten Laufzeit und dem üblicherweise konstanten Aufwand. Wichtig für einen effizienten Betrieb ist, neben einer wirkungsstarken Kopplung beispielsweise über Wärmetauscher geringer Grädigkeit, die Realisierung der Kopplung mit geringem Aufwand über effiziente Umwälzpumpen für den Medientransport. Im Bereich der Wärmeübergabesysteme können sich hocheffiziente Umwälzpumpen schon vermehrt durchsetzen. Der grösste Anteil des elektrischen Aufwands für die passive Kühlung fällt allerdings für die Erdwärmesonde an. Eine Halbierung des Aufwandes im passiven Kühlbetrieb unter anderem mit hocheffizienten Pumpen in der Erdwärmesonde und dadurch Verdoppelung des Wärmeerzeuger-Nutzungsgrades von 14.5 auf über 30 ist hier möglich.

4.3. Nutzungsgrad der passiven Kühlung

Gemäss den Definitionen in Kapitel 1.4.1 können mit der abgeführten Wärme für Raumkühlung aus der Gebäudeberechnung und dem berechneten Aufwand für die passive Kühlung gemäss Kapitel 4.2 der Wärmeerzeuger- und der System-Nutzungsgrad der passiven Kühlung berechnet werden. Dabei liegt die Annahme zugrunde, dass der Kühlbedarf durch die passive Kühlung mit Erdwärmesonden gedeckt werden kann. Diese Annahme kann in den durchgeführten Untersuchungen bestätigt werden für Niedertemperatur-Wärmeübergabesysteme und eine Ankopplung des Wärmeübergabesystems an die Erdwärmesonde mit einem Wärmeübertrager geringer Grädigkeit und bis zu einem Kälte-Wärme-Verhältnis von 40%.

$$WNG_C = \frac{Q_C}{E_{el,C,WNG}} = \frac{Q_C}{(P_{el,ctr+aux} + P_{el,Pu,BHE})_C * t_C} \quad \text{Gl.15}$$

$$SNG_C = \frac{Q_C}{E_{el,C,SNG}} = \frac{Q_C}{(P_{el,ctr+aux} + P_{el,Pu,BHE} + P_{el,Pu,em})_C * t_C} \quad \text{Gl.16}$$

Q_C	mit der passiven Kühlung abgeführte Wärme zur Raumkühlung
$E_{el,C,WNG}$	elektrischer Energieaufwand zur Berechnung des Wärmeerzeuger - Nutzungsgrades
$E_{el,C,SNG}$	elektrischer Energieaufwand zur Berechnung des System - Nutzungsgrades
$P_{el,ctr+aux}$	elektrische Leistungsaufnahme für Regelung und Hilfsenergie
$P_{el,Pu,BHE}$	elektrische Leistungsaufnahme der Umwälzpumpe Erdwärmesonde
$P_{el,Pu,em}$	elektrische Leistungsaufnahme der Umwälzpumpe Wärmeübergabesystem
t_C	Laufzeit der passiven Kühlung

Die Berechnung des Gesamt-Wärmeerzeuger-Nutzungsgrades erfolgt entweder als Verhältnis der Energiesummen erzeugter Wärme zu elektrischem Aufwand oder als energiegewichtete Summation der Einzel-Wärmeerzeuger-Nutzungsgrade, wie in Kapitel 1.4.1 als Gl. 4 definiert.

4.4. Einfluss der passiven Kühlung auf Heiz- und Warmwasserbetrieb

Der Einfluss der passiven Kühlung auf den Heiz- und Warmwasserbetrieb wird anhand des schon in Kapitel 3.5 dargestellten Vergleichs unterschiedlich intensiver Kühlung mit Erdwärmesonden detaillierter untersucht. Wichtigster Einfluss auf die Systemeffizienz ist der Wärmeeintrag in die Erdwärmesonde im Raumkühlbetrieb und die Speicherung der Wärme im Erdreich. Die eingespeicherte Wärme kann dann zu höheren Austrittstemperaturen der Erdwärmesonde im Heiz- und Warmwasserbetrieb mit Wärmeentzug aus der Erdwärmesonde führen. Dieser Effekt wird mit einem Vergleich der Simulationsergebnisse quantifiziert.

4.4.1. Analyse der Einflüsse

Über das gesamte Jahr betrachtet zeigen Tab. 9 und Tab. 10 für die drei Betriebsarten Heizen, Warmwasser und Klimakälte die Korrelation von erzeugter bzw. abgeführter Wärme mit den Wärmeerzeuger-Nutzungsgraden und den mittleren Austrittstemperaturen aus der Erdwärmesonde. Als Bezugsgrösse ist das Kälte/Wärme-Verhältnis mit aufgeführt, welches sich ergibt als Verhältnis von aus dem Raum in die Erdwärmesonde abgeführter Wärme zu der erzeugten Wärme mit Wärmeentzug aus der Erdwärmesonde im Heiz- und Warmwasserbetrieb. Die aufgeführten Temperaturen werden gebildet als Mittelwerte für die jeweils genannte Betriebsart bei aktivem Betrieb über die 15-Minuten-Werte für die genannte Zeitperiode.

	SEK3 S/W-WP 75% ME ohne C	SEK3 S/W-WP 75% ME	SEK3 S/W-WP 50% ME	SEK3 S/W-WP 25% ME	SEK3 S/W-WP 25% MEP
erzeugte Wärme					
Klimakälte	0 kWh/a	2'049 kWh/a	2'532 kWh/a	3'106 kWh/a	2'839 kWh/a
Heizwärme	9'417 kWh/a	9'494 kWh/a	9'454 kWh/a	9'372 kWh/a	6'985 kWh/a
Warmwasser	3'877 kWh/a	3'877 kWh/a	3'877 kWh/a	3'877 kWh/a	3'877 kWh/a
Total	13'294 kWh/a	15'420 kWh/a	15'863 kWh/a	16'355 kWh/a	13'701 kWh/a
Kälte/Wärme- Verhältnis	0%	15%	19%	23%	26%
Jahres-Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad					
Klimakälte	-/-	8.5	10.5	12.9	11.8
Heizwärme	4.36	4.36	4.37	4.37	4.40
Warmwasser	3.33	3.48	3.49	3.51	3.56
Total	4.0	4.4	4.5	4.7	4.7

Tab. 9: Variation von erzeugter Wärme und resultierende Wärmeerzeuger-Nutzungsgrade für die passive Kühlung

	SEK3 S/W-WP 75% ME ohne C	SEK3 S/W-WP 75% ME	SEK3 S/W-WP 50% ME	SEK3 S/W-WP 25% ME	SEK3 S/W-WP 25% MEP
Kälte/Wärme- Verhältnis	0%	15%	19%	23%	26%
Jahresmittel der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur					
Kühlbetrieb	-/-	13.0 °C	13.7 °C	14.4 °C	14.4 °C
Heizbetrieb	3.3 °C	3.5 °C	3.5 °C	3.7 °C	4.4 °C
Warmwasserbetrieb	4.5 °C	5.0 °C	5.2 °C	5.5 °C	6.1 °C
Warmwasserbetrieb an Kühltagen	6.1 °C	8.7 °C	9.4 °C	10.0 °C	10.0 °C

Tab. 10: Einfluss auf der passiven Kühlung auf die Erdwärmesonden-Austrittstemperaturen

Mit der Steigerung des Kälte/Wärme-Verhältnisses von 0% ohne Raumkühlung bis zu 23% bei intensiver Kühlnutzung im Minergie® Gebäude zeigt sich der Einfluss auf den Heizbetrieb nur marginal mit einer Steigerung der mittleren Austrittstemperatur um 0.4 K von 3.3 °C auf 3.7 °C und einer damit verbundenen Steigerung des Wärmeerzeuger-Nutzungsgrades um unter 1% von 4.36 auf 4.37. Für die Berechnung des Wärmeerzeuger-Nutzungsgrades kann dieser Einfluss bei der Auslegung vernachlässigt werden.

Ein stärkerer Einfluss des Wärmeeintrags in die Erdwärmesonde im passiven Kühlbetrieb zeigt sich beim Warmwasserbetrieb. Der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad steigt schon bei dem kleinsten betrachteten Kälte/Wärme-Verhältnis von 15% um 0.15 Arbeitszahlpunkte von 3.33 auf 3.48. Mit weiter steigendem Kälte/Wärme-Verhältnis zeigt sich eine weitere Erhöhung des Wärmeerzeuger-Nutzungsgrades auf bis zu 3.51. Der Einfluss auf die Austrittstemperatur der Erdwärmesonde im Warmwasserbetrieb ist besonders an Tagen an denen auch gekühlt wird bemerkenswert. Über das gesamte Jahr steigt die mittlere Austrittstemperatur von 4.5 °C auf 5.5 °C nur eher gering. Deutlich stärker ist der Einfluss auf die Austrittstemperatur an Kühltagen, also an Tagen an denen die Raumkühlung in der Minergie® Variante mit intensivster Kühlung (25% Verschattung) aktiv ist. Der Mittelwert der Austrittstemperaturen an diesen Kühltagen steigt von 6.1 °C ohne Kühlung auf bis zu 10.0 °C bei einem Kälte/Wärme-Verhältnis von 23%. Es bestätigt sich hiermit, dass eine kurzfristige Nutzung der in die Erdwärmesonde abgeführten Wärme erzielt werden kann, der langfristige Speichereffekt jedoch gering ist. Aus der Jahresbetrachtung zeigt sich, dass der Wärmeeintrag in die Erdwärmesonde durch die passive Kühlung den grössten Einfluss auf die Quellentemperatur der Wärmepumpe im Warmwasserbetrieb während der Kühlperiode hat.

Im jahreszeitlichen Verlauf der erzeugten Wärme für Klimakälte und der Steigerung der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur für die Variante Minergie® Gebäude mit geringer Verschattung (25%) im Vergleich zum ungekühlten Gebäude, dargestellt in Abb. 46, zeigt sich die weitgehende Proportionalität der beiden Grössen. Der Einfluss der eingetragenen Wärme in die Erdwärmesonde aus der Raumkühlung auf die Steigerung der Austrittstemperatur der Erdwärmesonde zeigt nur einen leichten Einfluss des Vormonats damit, dass das Maximum zwar einen Monat später erreicht wird, aber nur leicht höher liegt als der vorherige Wert und im Oktober zwar noch eine Steigerung festgestellt werden kann, diese aber mit 0.3 K sehr gering ausfällt. 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 zeigt nur eine geringe Phasenverschiebung zur abgeführten Wärme in die Erdwärmesonde.

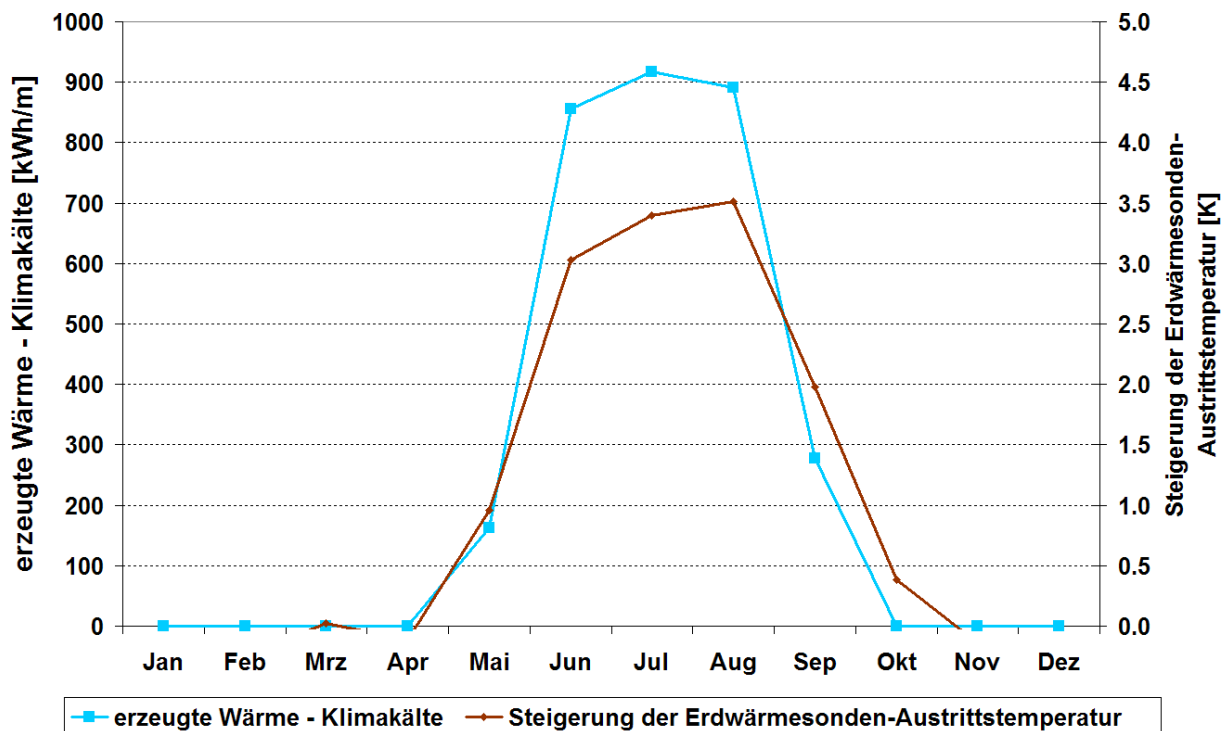


Abb. 46: Jahreszeitliche Korrelation von erzeugter Wärme für Klimakälte und Steigerung der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur für die Variante Minergie® Gebäude mit geringer Verschattung (25%)

In Tab. 11 sind die Austrittstemperaturen der Erdwärmesonde im Warmwasserbetrieb im Monatsmittel und die Steigerung gegenüber der Variante ohne Kühlung dargestellt. In den Monaten Oktober bis April wird das Gebäude, wie auch in Abb. 46 dargestellt, nicht gekühlt. Daher beschränkt sich die Darstellung auf die relevanten Monate Mai bis September.

Die Steigerungen der Monatsmittelwerte für die Austrittstemperatur der Erdwärmesonde zeigen für alle Varianten ein Verhalten ähnlich dem in Abb. 46 für eine Variante separat dargestellten. Dabei steigt die maximale monatliche Steigerung der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur mit steigendem Kälte/Wärme-Verhältnis. Um die Steigerung der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur in ein Rechenverfahren für den Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad im Warmwasserbetrieb zu integrieren, muss diese Steigerung vorausgerechnet werden. Dazu werden in den beiden folgenden Unterkapiteln zwei Modellierungsansätze vorgestellt. Kapitel 4.4.2 beschreibt eine empirische Modellierung für die monatliche Steigerung der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur basierend auf dem Kälte/Wärme-Verhältnis als Gradmesser für die Ausnutzung des Temperatursteigerungspotenzials. In Kapitel 4.4.3 wird eine physikalische Modellierung für die angenommen adiabate Wärmespeicherung in der Erdwärmesonde auf Tagesbasis vorgestellt.

	SEK3 S/W-WP 75% ME ohne C	SEK3 S/W-WP 75% ME	SEK3 S/W-WP 50% ME	SEK3 S/W-WP 25% ME	SEK3 S/W-WP 25% MEP
Kälte/Wärme- Verhältnis	0%	15%	19%	23%	26%
erzeugte Wärme - Klimakälte					
Mai	0	96 kWh	130 kWh	163 kWh	154 kWh
Juni	0	537 kWh	685 kWh	856 kWh	780 kWh
Juli	0	626 kWh	757 kWh	918 kWh	833 kWh
August	0	612 kWh	738 kWh	892 kWh	808 kWh
September	0	177 kWh	222 kWh	278 kWh	265 kWh
Monatsmittel der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur im Warmwasserbetrieb					
Mai	5.2 °C	5.6 °C	5.9 °C	6.1 °C	6.5 °C
Juni	5.9 °C	7.8 °C	8.4 °C	8.9 °C	9.0 °C
Juli	6.1 °C	8.4 °C	9.0 °C	9.5 °C	9.5 °C
August	6.2 °C	8.7 °C	9.2 °C	9.8 °C	9.7 °C
September	6.3 °C	7.5 °C	7.9 °C	8.3 °C	8.4 °C
Steigerung des Monatsmittels der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur im Warmwasserbetrieb					
Mai	0 K	0.4 K	0.7 K	1.0 K	0.9 K
Juni	0 K	2.0 K	2.5 K	3.0 K	2.9 K
Juli	0 K	2.3 K	2.9 K	3.4 K	3.2 K
August	0 K	2.5 K	3.0 K	3.5 K	3.3 K
September	0 K	1.2 K	1.6 K	2.0 K	1.9 K

Tab. 11: Korrelation des Kälte/Wärme-Verhältnisses mit der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur im Warmwasserbetrieb während der Kühlperiode

4.4.2. Modell 1 – Ausnutzungsgrad des Temperatursteigerungspotenzials

Die empirische Modellierung bezieht sich auf die maximale Steigerung der Quelltemperatur im Monatsmittel. Die Quelltemperatur für die Wärmepumpe erreicht maximal die Rücklauftemperatur des Wärmeübergabesystems, in diesem Fall der Fussbodenheizung, im Kühlbetrieb. Die maximale Steigerung der Quelltemperatur ist also die Differenz zwischen der Austrittstemperatur der Erdwärmesonde im Warmwasserbetrieb ohne Einfluss des passiven Kühlbetriebs und der Rücklauftemperatur des Wärmeübergabesystems im Kühlbetrieb (siehe Gl.17).

$$\Delta\Theta_{BHE,W,li,mo} = \Theta_{C,em,ret} - \Theta_{BHE,W,mo} \quad \text{Gl.17}$$

$\Delta\Theta_{BHE,W,li,mo}$	monatliche maximale Steigerung der Austrittstemperatur der Erdwärmesonden im Warmwasserbetrieb	[°C]
$\Theta_{C,em,ret}$	Rücklauf – Temperatur des Wärmeübergabesystems im Kühlbetrieb	[°C]
$\Theta_{BHE,W,mo}$	monatliche Austrittstemp. der Erdwärmesonde im WW - Betrieb	[°C]

$$f_{\Delta\Theta,BHE,W,li,mo} = (\Theta_{BHE,W,C,mo} - \Theta_{BHE,W,mo}) / (\Theta_{C,em,ret} - \Theta_{BHE,W,mo}) \quad \text{Gl.18}$$

$f_{\Delta\Theta,BHE,W,li,mo}$	monatliche relative Steigerung der Austrittstemperatur der Erdwärmesonden im Warmwasserbetrieb	[°C]
$\Theta_{C,em,ret}$	Rücklauf – Temperatur des Wärmeübergabesystems im Kühlbetrieb	
$\Theta_{BHE,W,C,mo}$	monatliche Austrittstemperatur der Erdwärmesonde im Warmwasserbetrieb, bei passiven Kühlbetrieb	[°C]
$\Theta_{BHE,W,mo}$	monatliche Austrittstemp. der Erdwärmesonde im WW - Betrieb	[°C]

Vergleicht man nun, wie in Tab. 12 dargestellt, die relative Steigerung der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur gemäss Gl.18 bei einer Rücklauftemperatur von 22 °C mit dem Kälte/Wärme-Verhältnis so zeigt sich eine gute Übereinstimmung der maximalen monatlichen relativen Steigerung der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur.

	SEK3 S/W-WP 75% ME ohne C	SEK3 S/W-WP 75% ME	SEK3 S/W-WP 50% ME	SEK3 S/W-WP 25% ME	SEK3 S/W-WP 25% MEP
Kälte/Wärme-Verhältnis	0%	15%	19%	23%	26%
relative Steigerung des Monatsmittels der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur im Warmwasserbetrieb gemäss Gl.18					
Mai	0%	2%	4%	6%	5%
Juni	0%	12%	16%	19%	18%
Juli	0%	15%	18%	21%	21%
August	0%	16%	19%	22%	21%
September	0%	7%	10%	13%	12%

Tab. 12: Korrelation des Kälte/Wärme-Verhältnisses mit der relativen Steigerung der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur im Warmwasserbetrieb während der Kühlperiode

Hiermit kann ein Bezug zwischen der im passiven Kühlbetrieb abgeführten und in die Erdwärmesonde eingetragenen Wärme und der maximalen Steigerung der Quelltemperatur im Warmwasserbetrieb hergestellt werden. Diese Korrelation wird hier betrachtet für ein Kälte/Wärme-Verhältnis bis zu 26%. Basierend auf einer früheren Untersuchung [23] konnte sie für ein Kälte/Wärme-Verhältnis von 40% bestätigt werden. Aufgrund der Datengrundlage und einem für die Anwendung in Wohngebäuden schon recht hohen Kälte/Wärme-Verhältnis von 40% wird die maximale Steigerung der Quelltemperatur auf diese 40% begrenzt.

Zu Sondenfeldern gab es in persönlichen Gesprächen Diskussionen, ob bei einem Wärmeeintrag der höher liegt als 50-100% des Wärmeentzuges, Probleme durch eine verschlechterte Wärmeleitung im Erdreich auftreten können, welche durch eine Austrocknung des Sondennahbereichs durch einen zu hohen Wärmeeintrag verursacht sind. Die Untersuchungen und Feldmessungen zeigen bisher für Wohnbauten keine Tendenz, dass Kälte/Wärme-Verhältnisse über 50% auftreten werden. Daher wird diese potenzielle Unsicherheit als wenig relevant erachtet. Sollte es jedoch zu einem solch hohen Wärmeeintrag kommen, so sollte dieser Effekt evaluiert werden.

Die Berücksichtigung der geringeren Steigerung der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur in den Monaten mit geringerer Kühlenergie erfolgt über das Verhältnis der monatlichen Kühlenergie zur maximalen monatlichen Kühlenergie. Damit ergibt sich für die Berechnung der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur im Warmwasserbetrieb bei passiver Kühlung mit der Erdwärmesonde der in Gl.19 aufgeführte Modellansatz. Die erzeugte Wärme für Klimakälte, Heizwärme und Warmwasser bezieht sich jeweils auf die aus der Erdwärmesonde erzeugte Wärme für diese Zwecke.

$$\Theta_{BHE,W,C,mo} = \Theta_{BHE,W,mo} + (\Theta_{C,em,ret} - \Theta_{BHE,W,mo}) * \max\left(\frac{Q_{C,an}}{Q_{H,an} + Q_{W,an}}; 40\%\right) * \frac{Q_{C,mo}}{Q_{C,mo,li}}$$

$\Theta_{BHE,W,C,mo}$	monatliche Austrittstemperatur der Erdwärmesonden im Warmwasserbetrieb [°C] bei Wärmeeintrag in die Erdwärmesonde durch passive Kühlung mit der Erdwärmesonde	Gl.19
$\Theta_{BHE,W,mo}$	monatliche Austrittstemperatur der Erdwärmesonden im Warmwasserbetrieb [°C]	
$\Theta_{C,em,ret}$	Rücklauf – Temperatur des Wärmeübergabesystems im Kühlbetrieb [°C]	
$\Theta_{BHE,W,mo}$	monatliche Austrittstemperatur der Erdwärmesonde im Warmwasserbetrieb [°C]	
$Q_{C,an}$	jährlich erzeugte Wärme für Klimakälte [kWh]	
$Q_{H,an}$	jährlich erzeugte Wärme für Heizwärme [kWh]	
$Q_{W,an}$	jährlich erzeugte Wärme für Warmwasser [kWh]	
$Q_{C,mo}$	monatlich erzeugte Wärme für Klimakälte [kWh]	
$Q_{C,mo,li}$	maximale monatlich erzeugte Wärme für Klimakälte [kWh]	

4.4.3. Modell 2 – adiabater Kurzzeit-Wärmespeicher

Die Beobachtungen aus den Feldmessungen und den Systemsimulationen zeigen, dass die durch die passive Kühlfunktion in die Erdwärmesonde abgeführte Wärme kurzzeitig gespeichert werden kann und für den Wärmeentzug nutzbar ist. Mit dem Ziel eines möglichst einfachen Modells für ein Handrechnungsverfahren des Jahresnutzungsgrades, wurde in der Modellierung angenommen, dass die eingetragene Wärme für einen Tag adiabatisch in der Erdwärmesonde eingespeichert werden kann. Aus dem Wärmeeintrag ergibt sich dann, bei einem im Tageszeitraum begrenzten, aktivierbaren Volumen um die Erdwärmesonde, die Temperatursteigerung in diesem Volumen gemäss Gl.20.

Die im Tageszyklus aktive Wärmekapazität der Erdwärmesonde wurde für die in der Validierung verwendeten Varianten bestimmt. Die äquivalente Wärmekapazität des aktivierten Erdreichs wurde bestimmt mit 89 Wh/mK. Das entspricht einem Durchmesser des aktiven Erdreichs d_G von 0.4 m. Damit ergibt sich für die gesamte Erdwärmesonde eine Wärmekapazität von 8.9 kWh/K.

$$\Delta\Theta_{BHE,W,C,d} = \frac{Q_{C,d}}{C_{BHE}} = \frac{Q_{C,d}}{(c_{p,Bh} * \rho_{Bh} * \frac{d_{Bh}^2}{4} + c_{p,G} * \rho_G * \frac{d_{G,d}^2 - d_{Bh}^2}{4}) * \pi * l_{BHE}}$$

$\Delta\Theta_{BHE,W,C,d}$	tagesweise Zunahme der Austrittstemperatur der Erdwärmesonden [K] im Warmwasserbetrieb bei Wärmeeintrag in die Erdwärmesonde durch passive Kühlung mit der Erdwärmesonde	Gl.20
$Q_{C,d}$	täglich erzeugte Wärme für Klimakälte	[kWh]
C_{BHE}	im Tageszyklus aktive Wärmekapazität der Erdwärmesonde	[kWh/K]
$c_{p,Bh}$	spezifische Wärmekapazität der Hinterfüllung im Bohrloch	[J/kgK]
ρ_{Bh}	Dichte der Hinterfüllung im Bohrloch	[kg/m ³]
d_{Bh}	Durchmesser des Bohrlochs	[m]
$c_{p,G}$	spezifische Wärmekapazität des Erdreichs	[J/kgK]
ρ_G	Dichte des Erdreichs	[kg/m ³]
d_G	Durchmesser des im Tageszyklus aktiven Erdreichs	[m]
l_{BHE}	Länge der Erdwärmesonde	[m]

Für die Verfahren zur Berechnung des Jahresnutzungsgrades wird meist mit grösseren Zeitabschnitten gerechnet, oft monatsweise oder jahresweise. Unter der Annahme, dass der Warmwasser-Tagesbedarf über das Jahr gleichmässig verteilt ist und die Zunahme der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur somit gleichmässig genutzt wird, kann die tagesweise Zunahme der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur arithmetisch über längere Zeiträume gemittelt werden. Für die monatsweise Zunahme Erdwärmesonden-Austrittstemperatur ergibt sich Gl.21.

$$\Delta\Theta_{BHE,W,C,m} = \frac{\sum_m \Delta\Theta_{BHE,W,C,d}}{n_{d,m}} = \frac{\sum_m \frac{Q_{C,d}}{C_{BHE}}}{n_{d,m}} = \frac{\sum_m Q_{C,d}}{C_{BHE} * n_{d,m}} = \frac{Q_{C,m}}{C_{BHE} * n_{d,m}}$$

$\Delta\Theta_{BHE,W,C,m}$	monatsweise Zunahme der Austrittstemperatur der Erdwärmesonden [K] im Warmwasserbetrieb bei Wärmeeintrag in die Erdwärmesonde durch passive Kühlung mit der Erdwärmesonde	Gl.21
$\Delta\Theta_{BHE,W,C,d}$	tagesweise Zunahme der Austrittstemperatur der Erdwärmesonden [K] im Warmwasserbetrieb bei Wärmeeintrag in die Erdwärmesonde durch passive Kühlung mit der Erdwärmesonde	
$n_{d,m}$	Anzahl Tage im Monat	[- / -]
$Q_{C,d}$	täglich erzeugte Wärme für Klimakälte	[kWh]
$Q_{C,m}$	monatlich erzeugte Wärme für Klimakälte	[kWh]
C_{BHE}	im Tageszyklus aktive Wärmekapazität der Erdwärmesonde	[kWh/K]

Bestimmung der im Tageszyklus äquivalenten Wärmekapazität der Erdwärmesonde

Für alle Erdwärmesondensimulationen wurde im Sondennahbereich ein zylinderförmiger Erdreichkörper mit 2.5 m Radius, unterteilt in 5 Schichten, betrachtet. Die Abmasse der radialen Hohlzylinder-Elemente sind in Tab. 13 aufgeführt, eine skizzierte Darstellung des verwendeten Modells zeigt Abb. 47.

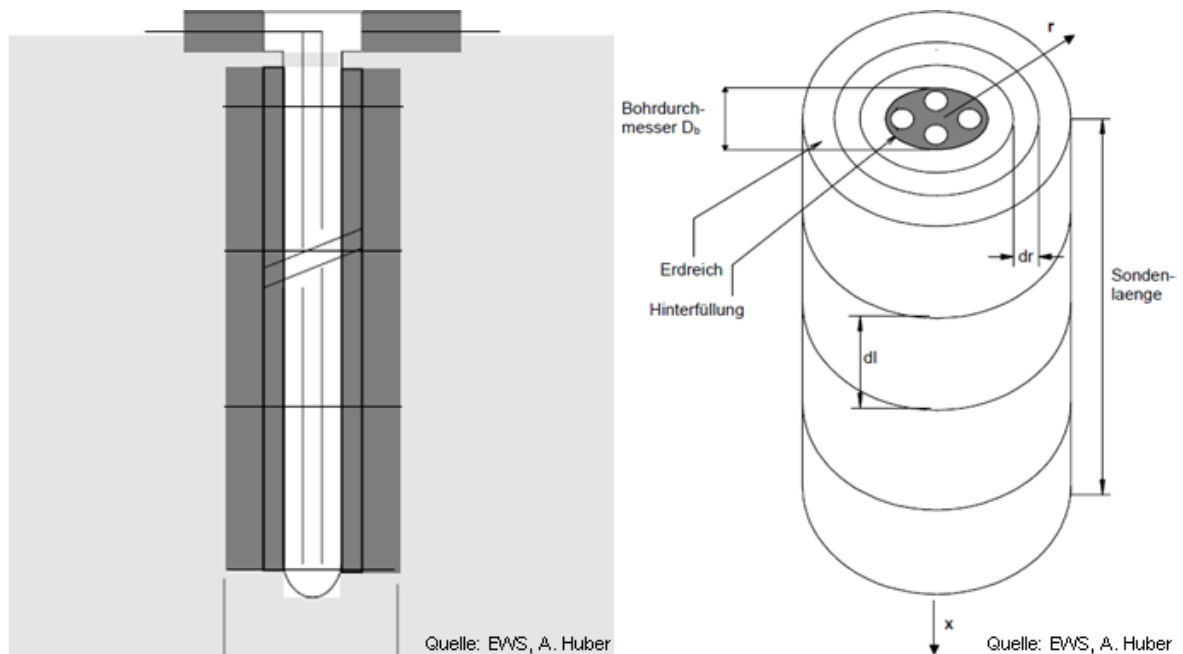


Abb. 47: Skizzierte Darstellung des Erdwärmesondenmodells [24]

Schicht	innerer Radius	Schwerpunkt-Radius	äusserer Radius
Sole	0 m	0.013 m	0.013 m
Erdreich 1	0.013 m	0.043 m	0.060 m
Erdreich 2	0.060 m	0.163 m	0.223 m
Erdreich 3	0.223 m	0.418 m	0.548 m
Erdreich 4	0.548 m	0.932 m	1.199 m
Erdreich 5	1.199 m	1.960 m	2.500 m

Tab. 13: radialen Abmasse im EWS-Simulationsmodell mit 2.5 m Radius und 5 Erdreich-Schichten

Abb. 48 zeigt den Temperaturverlauf im Erdreich in 50 m Tiefe für die radialen Hohlzylinder-Elemente über eine Zeitperiode von 5 Jahren.

In Abb. 49 ist der Zeitraum vom 01. – 22. Juli des 5. Jahres vergrössert dargestellt. Der Wärmeeintrag im passiven Kühlbetrieb beeinflusst die Temperaturen bis inklusive der Schicht mit Schwerpunkt-Radius 0.163 m. Die darauf folgende Schicht mit Schwerpunkt-Radius 0.418 m zeigt nur noch eine sehr geringe und verzögerte Reaktion auf den Wärmeeintrag. Daraus ergibt sich ein aktivierbares Erdvolumen bis zur Schicht Erdreich 2 mit einem äusseren Radius 0.223 m.

Für die Variante SEK3 MEP shd025 (siehe Tab. 5) wurde zusätzlich ein zylinderförmiger Erdreichkörper mit 5 m Radius, unterteilt in 10 Schichten, betrachtet (Abmasse siehe Tab. 14), um abzuschätzen, ob die für die anderen Varianten gewählte Modellierung ausreichend genau ist.

Schicht	innerer Radius	Schwerpunkt-Radius	äusserer Radius
Sole	0.000 m	0.013 m	0.013 m
Erdreich 1	0.013 m	0.043 m	0.060 m
Erdreich 2	0.060 m	0.065 m	0.070 m
Erdreich 3	0.070 m	0.080 m	0.089 m
Erdreich 4	0.089 m	0.110 m	0.128 m
Erdreich 5	0.128 m	0.171 m	0.205 m
Erdreich 6	0.205 m	0.293 m	0.360 m
Erdreich 7	0.360 m	0.537 m	0.669 m
Erdreich 8	0.669 m	1.026 m	1.288 m
Erdreich 9	1.288 m	2.004 m	2.525 m
Erdreich 10	2.525 m	3.961 m	5.000 m

Tab. 14: radialen Abmasse im EWS-Simulationsmodell mit 5 m Radius und 10 Erdreich-Schichten

Abb. 50 zeigt den Temperaturverlauf im Erdreich in 50 m Tiefe für die radialen Hohlzylinder-Elemente über eine Zeitperiode von 5 Jahren.

In Abb. 51 ist der Zeitraum vom 01. – 22. Juli des 5. Jahres vergrössert dargestellt. Der Wärmeeintrag im passiven Kühlbetrieb beeinflusst die Temperaturen bis inklusive der Schicht mit Schwerpunkt-Radius 0.171 m. Die darauf folgende Schicht mit Schwerpunkt-Radius 0.293 m zeigt nur noch einen sehr geringen Temperaturanstieg von unter 0.3 K mit verzögerter Reaktion auf den Wärmeeintrag. Daraus ergibt sich ein im Tageszyklus des passiven Kühlbetriebs aktivierbares Erdvolumen bis zur Schicht Erdreich 5, was einem äusseren Radius von 0.205 m entspricht.

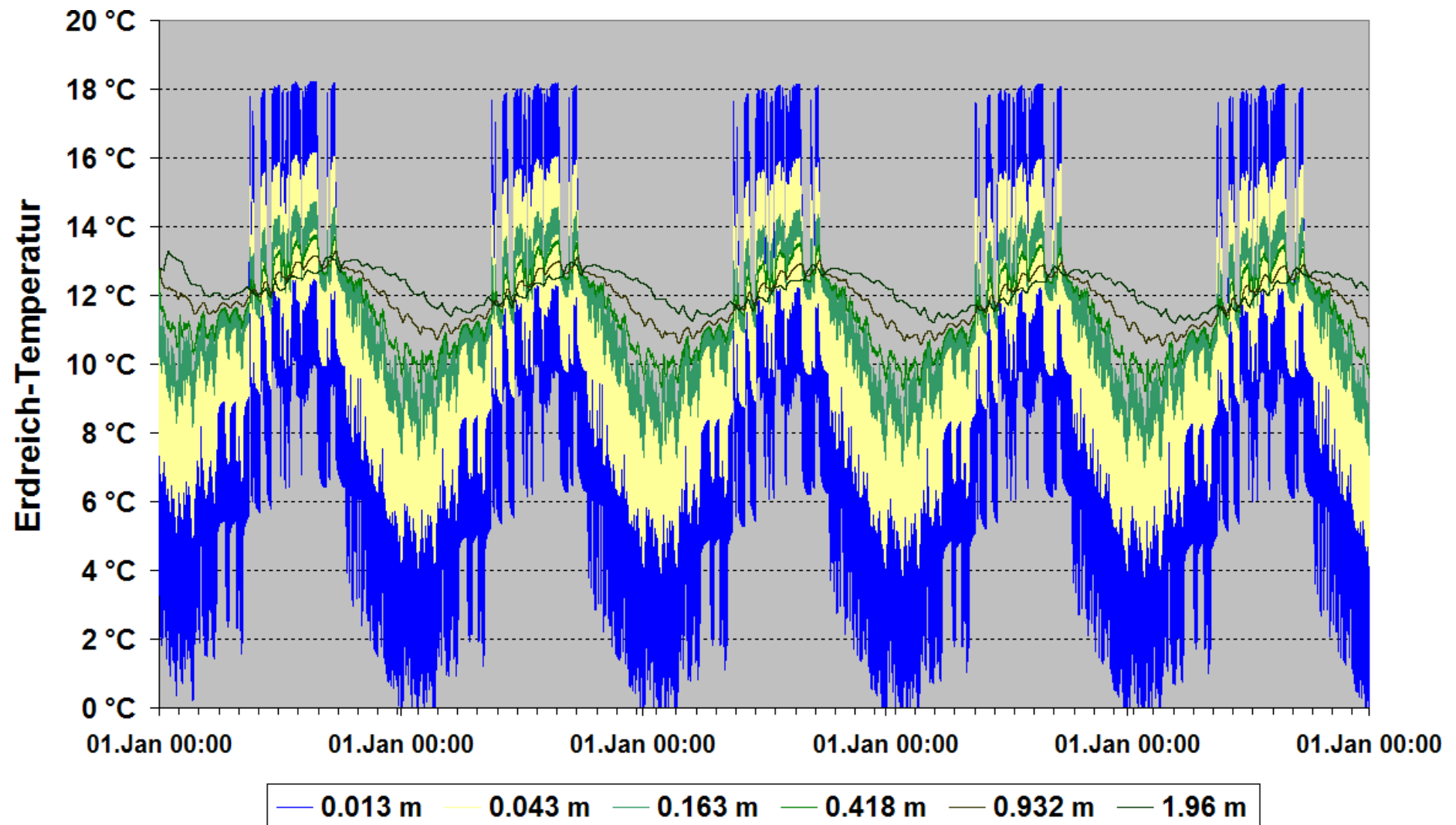


Abb. 48: Radiales Temperaturfeld der 100 m EWS in 50 m Tiefe für die Flächenschwerpunkte der radialen Elemente (Parameterangabe = Radius der Flächenschwerpunkte; Modell mit 5 Erdreich-Schichten; 5-Jahres-Verlauf)

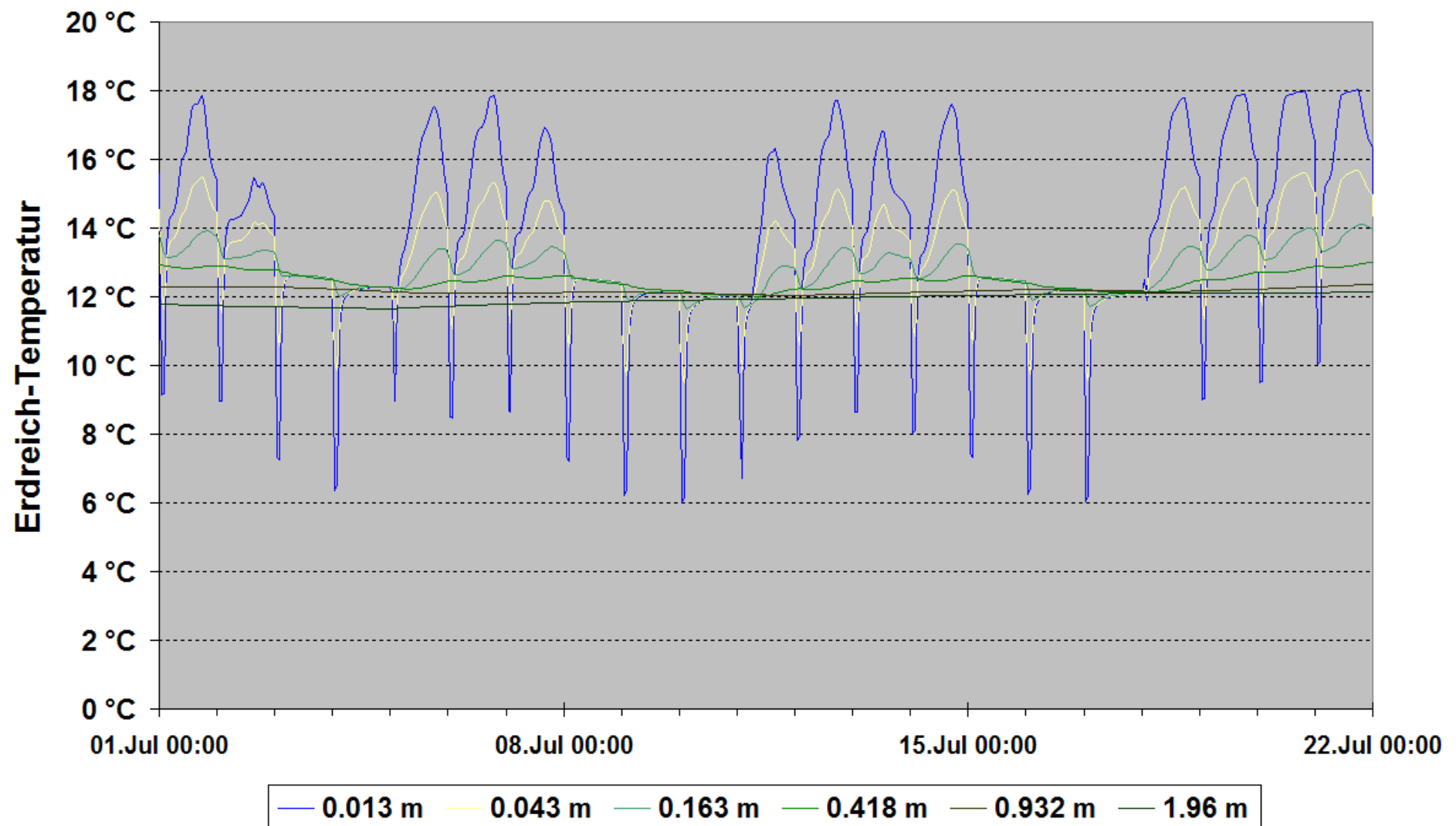


Abb. 49: Radiales Temperaturfeld der 100 m EWS in 50 m Tiefe für die Flächenschwerpunkte der radialen Elemente (Parameterangabe = Radius der Flächenschwerpunkte; Modell mit 5 Erdreich-Schichten; 01. bis 22. Juli des 5. Jahres)

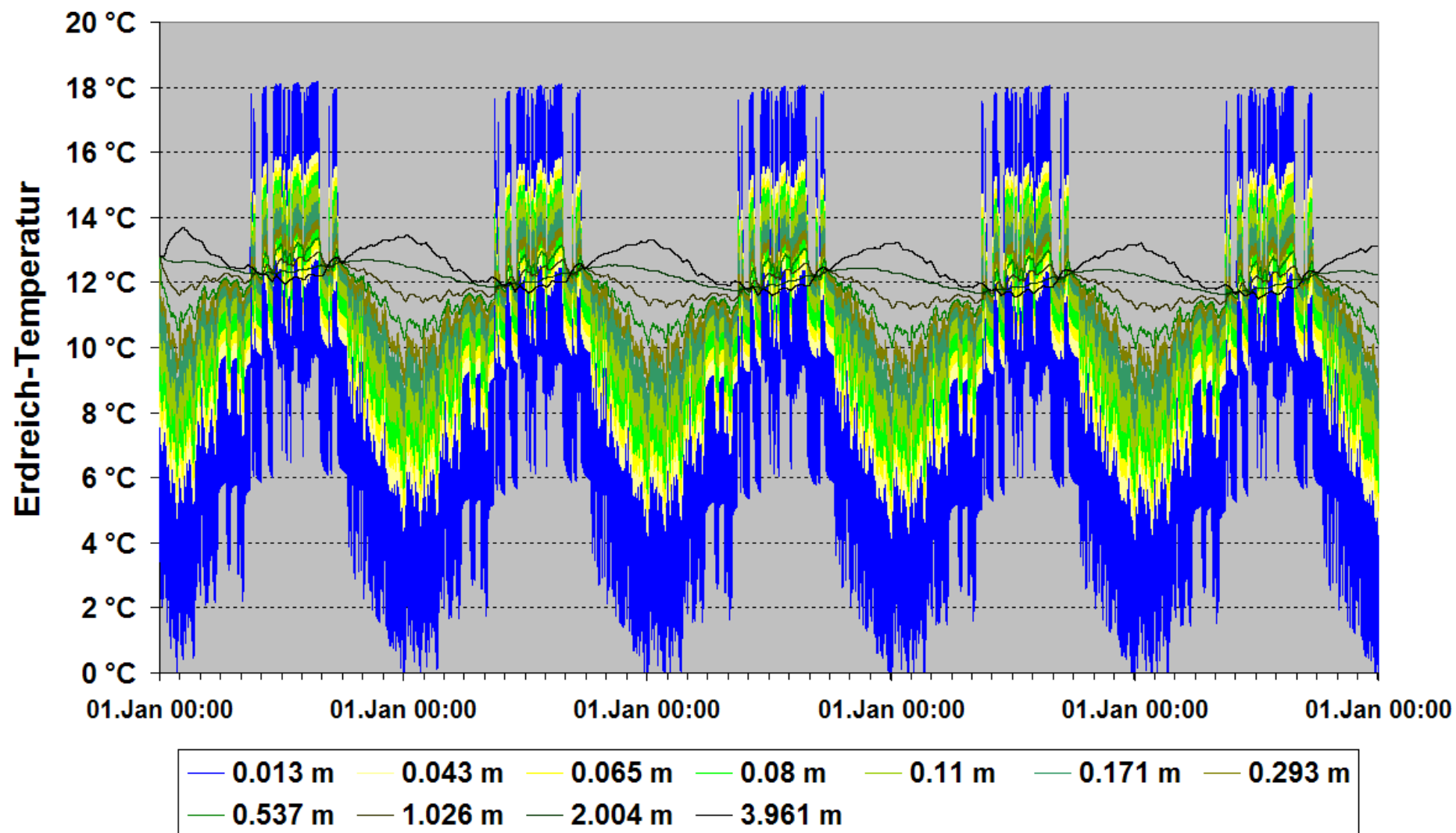


Abb. 50: Radiales Temperaturfeld der 100 m EWS in 50 m Tiefe für die Flächenschwerpunkte der radialen Elemente (Parameterangabe = Radius der Flächenschwerpunkte; Modell mit 10 Erdreich-Schichten; 5-Jahres-Verlauf)

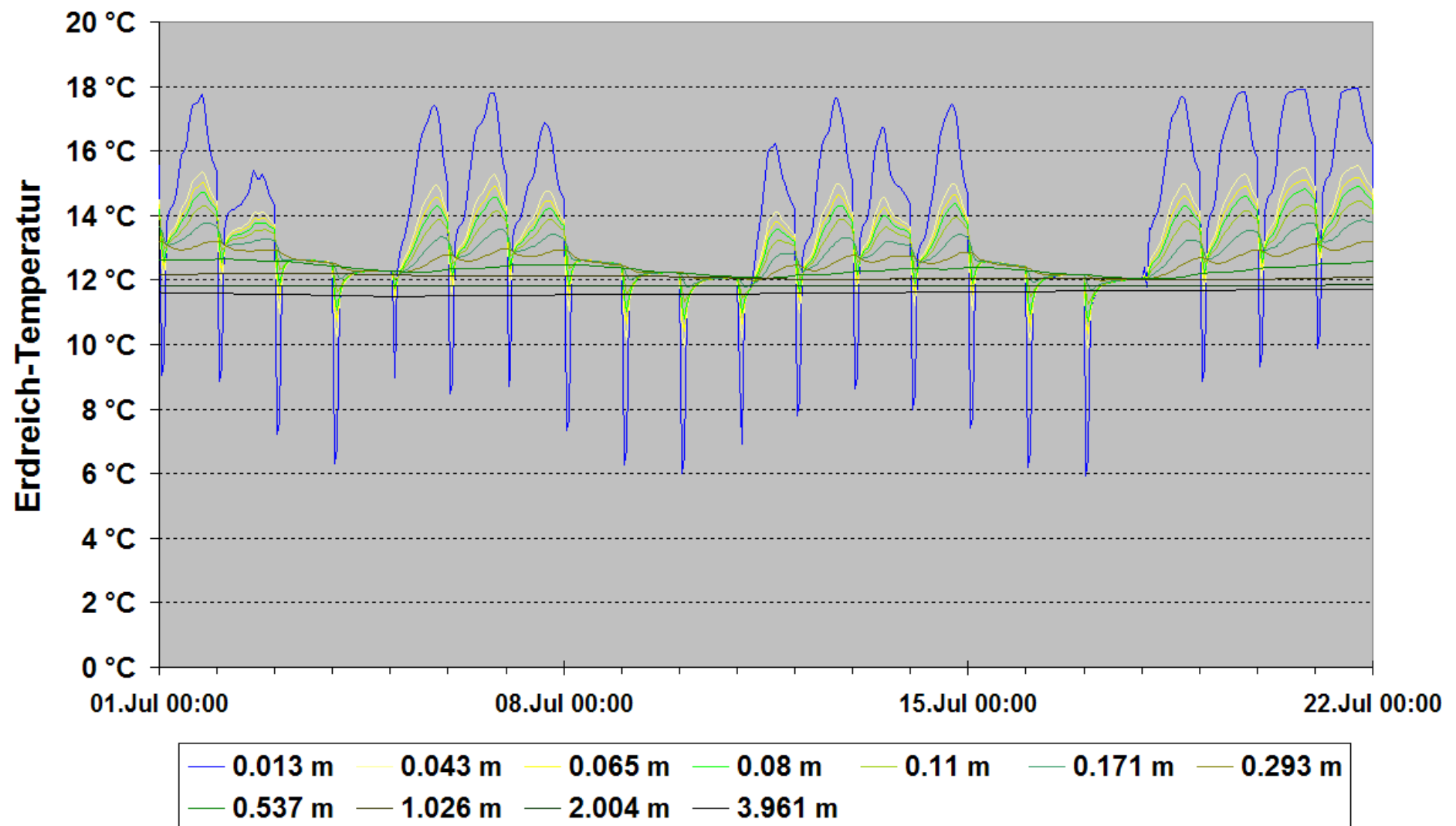


Abb. 51: Radiales Temperaturfeld der 100 m EWS in 50 m Tiefe für die Flächenschwerpunkte der radialen Elemente (Parameterangabe = Radius der Flächenschwerpunkte; Modell mit 10 Erdreich-Schichten; 01. bis 22. Juli des 5. Jahres)

4.4.4. Validierung Rechenmodell mit Simulationen

Für die Validierung der beiden Modelle wurden die Simulationsvarianten aus Kapitel 3.5 verwendet. In Tab. 15 sind die mit den Rechenmethoden ermittelten Zunahmen der Erdwärmesonden-Austrittstemperaturen in Kelvin denen aus der detaillierten Simulation gegenübergestellt. Die Abkürzung M1 bezeichnet die Ergebnisse für „Modell 1 – Ausnutzungsgrad des Temperatursteigerungspotenzials“ und M2 die Ergebnisse für „Modell 2 – adiabater Kurzzeit-Wärmespeicher“.

	SEK3 S/W-WP 75% ME ohne C			SEK3 S/W-WP 75% ME			SEK3 S/W-WP 50% ME			SEK3 S/W-WP 25% ME			SEK3 S/W-WP 25% MEP		
Kälte/Wärme- Verhältnis	0%			15%			19%			23%			26%		
	S	M1	M2	S	M1	M2	S	M1	M2	S	M1	M2	S	M1	M2
Mai	0	0	0	0.4	0.3	0.3	0.7	0.4	0.5	1.0	0.5	0.6	0.9	0.5	0.6
Juni	0	0	0	2.0	1.9	2.0	2.5	2.3	2.6	3.0	2.8	3.2	2.9	3.2	2.9
Juli	0	0	0	2.3	2.4	2.3	2.9	3.0	2.7	3.4	3.7	3.3	3.2	4.2	3.0
August	0	0	0	2.5	2.3	2.2	3.0	2.9	2.7	3.5	3.6	3.2	3.3	4.0	2.9
September	0	0	0	1.2	0.5	0.7	1.6	0.6	0.8	2.0	0.7	1.0	1.9	0.8	1.0
JAHR	0	0	0	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	1.0	0.9	1.0	0.9	1.1	0.9

Tab. 15: Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse und der Rechenmethoden für die Zunahme der mittleren Erdwärmesonden-Austrittstemperatur im Warmwasserbetrieb in Kelvin durch die passive Kühlung (S: Simulation / M1: Ausnutzungsgrad des Temperatursteigerungspotenzials / M2: adiabater Kurzzeit-Wärmespeicher)

Das Modell 1 – Ausnutzungsgrad des Temperatursteigerungspotenzials zeigt für die Monate Juni bis August mit intensiver Nutzung der Raumkühlung und das Minergie® Gebäude eine sehr gute Übereinstimmung mit Abweichungen zwischen 0.1 K und 0.3 K. Für die Monate Mai und September mit geringerer Nutzung der Raumkühlung ergibt sich eine befriedigende Übereinstimmung mit Abweichungen im Bereich 0.1 K bis maximal 1 K. Für das Minergie-P® Gebäude ergeben sich in den Monatswerten ebenso grössere Abweichungen zwischen 0.3 K und 1.1 K. Das Modell 2 – adiabater Kurzzeit-Wärmespeicher zeigt eine insgesamt bessere Übereinstimmung damit, dass für die Monate Juni bis August, mit intensiver Nutzung der Raumkühlung, für beide Gebäudetypen die Abweichungen im Bereich 0 K bis 0.4 K liegen. Für die Monate zu Beginn respektive Ende der Kühlperiode zeigen sich auch hier grössere Abweichungen bis zu 1 K. Die resultierenden Steigerungen der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur im Warmwasserbetrieb für das gesamte Jahr wiederum zeigen mit Abweichungen von 0.1 K bis 0.2 K eine sehr gute Übereinstimmung, wobei wiederum das Modell 2 – adiabater Kurzzeit-Wärmespeicher bessere Ergebnisse aufweist.

4.4.5. Fazit

Zur Berechnung des Einflusses der passiven Kühlung auf den Heiz- und Warmwasserbetrieb mit erdgekoppelten Wärmepumpen wurden zwei Modelle entwickelt. Dabei kommt Modell 1 – Ausnutzungsgrad des Temperatursteigerungspotenzials – mit weniger Daten aus, zeigt aber auch grössere Abweichungen. Modell 2 – adiabater Kurzzeit-Wärmespeicher – zeigt eine bessere Übereinstimmung, erfordert aber auch detaillierte Daten über die Erdwärmesonde. Auch bei einer auf einen Tag begrenzten Berücksichtigung der Wärmespeicherung im Erdreich und unter Vernachlässigung der saisonalen Speichereffekte zeigte sich für die Anwendung an Einzelsonden eine gute Übereinstimmung mit der detaillierten Simulation. Beide Modelle haben in Perioden intensiver Kühlnutzung eine Unsicherheit von unter 0.4 K, über die gesamte Kühlperiode von unter 0.2 K.

4.5. Integration der passiven Kühlung in die BIN-Methode

Die passive Kühlung mit Erdwärmesonden findet bei der Berechnung des Wärmeerzeuger-Nutzungsgrades für den Heiz- und Warmwasserbetrieb mit der BIN-Methode Berücksichtigung bei der Berechnung der Wärmequellen-Temperatur für den Warmwasserbetrieb; hinzu kommt die Aufwandsberechnung für die passive Kühlung womit auch die Verteilung des Aufwandes für Hilfsenergie im Heiz- und Warmwasser-Betrieb anzupassen ist. Die Implementierung erfolgt basierend auf der EN 15316-4-2 als Monatsverfahren. Das Monatsverfahren entspricht dabei sehr gut der Charakteristik der passiven Kühlung da auf Monatsebene, wie in Kapitel 4.4 mit Abb. 46 gezeigt, eine gute Korrelation zwischen Klimakältebezug und der Steigerung der Erdwärmesonden-Austrittstemperatur im Warmwasserbetrieb besteht. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die in Kapitel 3.5 und 4.4 für die Analyse verwendeten Varianten.

4.5.1. Vergleich BIN-Methode und Simulation für Heiz- und Warmwasserbetrieb

Grundlage für die Implementierung der passiven Kühlung bildet die Variante ohne passiven Kühlbetrieb aus Kapitel 4.4. Die Ergebnisse beider Methoden für die Variante ohne passive Kühlung zeigen die schon existierende Abweichung der beiden Methoden vor der Integration der passiven Kühlung. Die Simulationsergebnisse sind in Tab. 16 und Tab. 17 den Ergebnissen der BIN-Methode gegenübergestellt. Die Nutzwärmemengen $Q_{H,u}$ und $Q_{W,u}$ sind Eingabegrößen in der Berechnung nach der BIN-Methode, weshalb diese Werte übereinstimmen. Weiterhin ist die Berechnung der Wärmeverluste für Speicherung und Verteilung im Warmwasserbetrieb identisch angenommen worden, sodass auch die erzeugten Wärmemengen $Q_{H,gen}$ und $Q_{W,gen}$ übereinstimmen. Die Unterschiede ergeben sich im daraus berechneten elektrischen Aufwand für die Wärmeerzeugung und Verteilung und den daraus resultierenden Wärmeerzeuger- respektive System-Nutzungsgraden.

Wärme, Q			elektrischer Aufwand, E			
	Simulation	BIN-Methode		Simulation	BIN-Methode	
$Q_{H,gen}$	9'417 kWh/a	0%	$E_{H,gen}$	2'161 kWh/a	2'059 kWh/a	-5%
$Q_{W,gen}$	3'877 kWh/a	0%	$E_{W,gen}$	1'163 kWh/a	1'194 kWh/a	3%
$Q_{HW,gen}$	13'294 kWh/a	0%	$E_{HW,gen}$	3'324 kWh/a	3'253 kWh/a	-2%
$Q_{H,u}$	9'417 kWh/a	0%	$E_{H,sys}$	2'209 kWh/a	2'145 kWh/a	-3%
$Q_{W,u}$	2'778 kWh/a	0%	$E_{W,sys}$	1'174 kWh/a	1'210 kWh/a	3%
$Q_{HW,u}$	12'195 kWh/a	0%	$E_{HW,sys}$	3'383 kWh/a	3'355 kWh/a	-1%

Tab. 16: Gegenüberstellung der Energiegrößen aus Simulation und BIN-Methode für Heiz- und Warmwasserbetrieb

Der elektrische Aufwand im Heizbetrieb fällt mit der Berechnung nach BIN-Methode leicht geringer aus und weicht für die Bilanzgrenze Wärmeerzeuger um -102 kWh/a oder -5% und für die Bilanzgrenze System um -64 kWh/a oder -3% ab. Im Warmwasserbetrieb berechnet die BIN-Methode im Gegenzug einen leicht höheren elektrischen Aufwand für den Wärmeerzeuger mit einer Differenz von 31 kWh/a oder 3% und für das gesamte System 36 kWh/a respektive auch 3%. Über beide Betriebsarten zusammengekommen ergibt sich somit eine Abweichung von -2% respektive -71 kWh/a für die Bilanzgrenze Wärmeerzeuger und -1% respektive -28 kWh/a für das System. Da die erzeugte Wärme identisch ist, zeigen die Wärmeerzeuger- und System-Nutzungsgrade in Tab. 17 eine ebenso gute Übereinstimmung wie die Ergebnisse für den elektrischen Aufwand.

Mit der guten Übereinstimmung der Ergebnisse aus der Simulation und der BIN-Methode für den Heiz- und Warmwasserbetrieb kann der Einfluss der beschriebenen Effekte bei der

Integration der passiven Kühlung auf eine gemeinsame Referenz bezogen und nachvollzogen werden.

Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad, WNG			
	Simulation	BIN-Methode	
WNG_H	4.4	4.6	5%
WNG_W	3.3	3.2	-3%
WNG_{HW}	4.0	4.1	2%
System-Nutzungsgrad, SNG			
	Simulation	BIN-Methode	
SNG_H	4.3	4.4	3%
SNG_W	2.4	2.3	-3%
SNG_{HW}	3.6	3.6	1%

Tab. 17: Gegenüberstellung der Nutzungsgrade aus Simulation und BIN-Methode für Heiz- und Warmwasserbetrieb

4.5.2. Vergleich BIN-Methode / Simulation für Heiz-, Warmwasser- und passiven Kühlbetrieb

Der passive Kühlbetrieb wurde nach den in den Kapitel 4.2 und 4.4 beschriebenen Methoden in die Berechnung des Wärmeerzeuger- und System-Nutzungsgrades für Heiz- und Warmwasserbetrieb mit der BIN-Methode auf Monatsbasis integriert. Die Ergebnisse der BIN-Methode sind den Simulationen gegenübergestellt für eine Variante mit starker Verschattung (75%) in Tab. 18 und Tab. 19 sowie für eine Variante mit geringer Verschattung (25%) und intensiver Kühlnutzung in Tab. 20 und Tab. 21. Durch die Variation der Verschattung und den zusätzlichen Kühlbetrieb ergeben sich geringe Abweichungen in der erzeugten Wärme für Heizen, die jedoch unter 1% liegen und in der BIN-Methode nicht abgebildet werden. Der elektrische Aufwand für den Warmwasserbetrieb kann mit einer Abweichung von nur 1% für beide Varianten sehr gut abgebildet werden. Ebenso kann der Aufwand für die passive Kühlung anhand der Kühlgrenze und den Laufzeiten sehr gut abgebildet werden mit einer Abweichung von 2%.

Wärme, Q				elektrischer Aufwand, E			
	Simulation	BIN-Methode			Simulation	BIN-Methode	
$Q_{H,gen}$	9'494 kWh/a	9'417 kWh/a	-1%	$E_{H,gen}$	2'176 kWh/a	2'059 kWh/a	-5%
$Q_{W,gen}$	3'877 kWh/a		0%	$E_{W,gen}$	1'114 kWh/a	1'115 kWh/a	1%
$Q_{C,gen}$	2'049 kWh/a		0%	$E_{C,gen}$	241 kWh/a	246 kWh/a	2%
$Q_{HWC,gen}$	15'420 kWh/a	15'343 kWh/a	0%	$E_{HWC,gen}$	3'531 kWh/a	3'420 kWh/a	-3%
$Q_{H,u}$	9'494 kWh/a	9'417 kWh/a	-1%	$E_{H,sys}$	2'224 kWh/a	2'145 kWh/a	-4%
$Q_{W,u}$	2'778 kWh/a		0%	$E_{W,sys}$	1'128 kWh/a	1'131 kWh/a	1%
$Q_{C,u}$	2'049 kWh/a		0%	$E_{C,sys}$	287 kWh/a	293 kWh/a	2%
$Q_{HWC,u}$	14'320 kWh/a	14'243 kWh/a	-1%	$E_{HWC,sys}$	3'639 kWh/a	3'569 kWh/a	-2%

Tab. 18: Gegenüberstellung der Energiegrößen aus Simulation und BIN-Methode für Heiz-, Warmwasser- und Kühlbetrieb mit starker Verschattung (75%)

Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad, WNG			
WNG_H	4.4	4.6	5%
WNG_W	3.5	3.5	-1%
WNG_C	8.5	8.3	-2%
WNG_{HWC}	4.4	4.5	3%
System-Nutzungsgrad, SNG			
SNG_H	4.3	4.4	3%
SNG_W	2.5	2.5	-1%
SNG_C	7.1	7.0	-2%
SNG_{HWC}	3.9	4.0	1%

Tab. 19: Gegenüberstellung der Nutzungsgrade aus Simulation und BIN-Methode für Heiz-, Warmwasser- und Kühlbetrieb mit starker Verschattung (75%)

Wärme, Q				elektrischer Aufwand, E			
	Simulation	BIN-Methode			Simulation	BIN-Methode	
Q_{H,gen}	9'372 kWh/a	9'417 kWh/a	0%	E_{H,gen}	2'144 kWh/a	2'059 kWh/a	-4%
Q_{W,gen}	3'877 kWh/a		0%	E_{W,gen}	1'105 kWh/a	1'115 kWh/a	1%
Q_{C,gen}	3'106 kWh/a		0%	E_{C,gen}	241 kWh/a	246 kWh/a	2%
Q_{HWC,gen}	16'355 kWh/a	16'400 kWh/a	0%	E_{HWC,gen}	3'490 kWh/a	3'420 kWh/a	-2%
Q_{H,u}	9'372 kWh/a	9'417 kWh/a	0%	E_{H,sys}	2'192 kWh/a	2'145 kWh/a	-2%
Q_{W,u}	2'777 kWh/a		0%	E_{Wsys}	1'118 kWh/a	1'131 kWh/a	1%
Q_{C,u}	3'106 kWh/a		0%	E_{Csys}	287 kWh/a	293 kWh/a	2%
Q_{HWC,u}	15'255 kWh/a	15'300 kWh/a	0%	E_{HWC,sys}	3'597 kWh/a	3'569 kWh/a	-1%

Tab. 20: Gegenüberstellung der Energiegrößen aus Simulation und BIN-Methode für die Variante mit geringer Verschattung (25%)

Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad, WNG			
WNG_H	4.4	4.6	5%
WNG_W	3.5	3.5	-1%
WNG_C	12.9	12.6	-2%
WNG_{HWC}	4.7	4.8	2%
System-Nutzungsgrad, SNG			
SNG_H	4.3	4.4	3%
SNG_W	2.5	2.5	-1%
SNG_C	10.8	10.6	-2%
SNG_{HWC}	4.2	4.3	1%

Tab. 21: Gegenüberstellung der Nutzungsgrade aus Simulation und BIN-Methode für die Variante mit geringer Verschattung (25%)

4.5.3. Wie setzt sich die Verbesserung des Wärmeerzeuger-Nutzungsgrades zusammen?

Der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad im Warmwasserbetrieb steigt durch die zusätzliche passive Kühlung mit einer Erdwärmesonden-Wärmepumpenanlage für Heiz- und Warmwasserbetrieb durch den geringeren elektrischen Aufwand. Dieser wird verursacht einerseits durch die höhere Quelltemperatur im Warmwasserbetrieb im Sommer und andererseits durch den geringeren elektrischen Stand-By Aufwand im Sommer, da die Regelfunktionen dann für den Kühlbetrieb genutzt werden. Interessant ist nun die Ausprägung dieser beiden Effekte. In Tab. 22 ist für drei Varianten dargestellt, wie stark diese beiden Effekte zu der Steigerung des Wärmeerzeuger-Nutzungsgrades beitragen. Den grössten Effekt in der Jahresbilanz hat die Reduktion des elektrischen Stand-By Aufwandes im Sommer mit einer Reduktion um -5%. Die Steigerung der Quelltemperatur im Warmwasserbetrieb hat mit einer Reduktion des elektrischen Aufwandes von -1% respektive -2% den geringeren Anteil in der Jahresbilanz. Die korrekte Zuordnung des Stand-By Aufwandes spielt hier also eine mindestens ebenso wichtige Rolle.

		SEK3 S/W-WP 75% ME ohne C	SEK3 S/W-WP 75% ME	SEK3 S/W-WP 25% ME
Kälte/Wärme-Verhältnis	$Q_C/(Q_H+Q_W)$	0%	15%	23%
Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad Warmwasser	WNG_W	3.3	3.5	3.5
Differenz des el. Aufwandes für Wärmeerzeugung im Warmwasserbetrieb	$\Delta E_{W,gen}$	0	-6%	-7%
Differenz des el. Aufwandes für Stand-By im Warmwasserbetrieb	$\Delta E_{W,gen,St}$	0	-5%	-5%
Differenz des el. Aufwandes für Wärmeerzeugung im Warmwasserbetrieb durch die Quellentemperaturerhöhung	$\Delta E_{W,gen,Sc}$	0	-1%	-2%

Tab. 22: Allokation der Reduktion des elektrischen Aufwandes für den Warmwasserbetrieb verursacht durch den passiven Kühlbetrieb

4.5.4. Zuordnung des Stand-By Aufwandes zu den Betriebsarten

In der, dem Rechenverfahren für die passive Kühlung, zugrundeliegenden Umsetzung der BIN-Methode wird der elektrische Aufwand für Stand-By anhand der verbleibenden Zeit ausserhalb der aktiven Betriebszeiten im Heiz- und Warmwasserbetrieb ermittelt. Die Zuordnung zum Heiz- respektive Warmwasserbetrieb erfolgt anhand der Heizgrenze, sodass der Aufwand für Stand-By bei Aussentemperaturen unterhalb der Heizgrenze dem Heizbetrieb und oberhalb der Heizgrenze dem Warmwasserbetrieb zugeordnet wird. In der Erweiterung mit dem passiven Kühlbetrieb wird dieses Konzept fortgeführt. So wird oberhalb der Kühlgrenze der Aufwand für Stand-By dem Kühlbetrieb zugeordnet. Der Stand-By Aufwand im Heizbetrieb bleibt bei dieser Zuordnung konstant. Der Stand-By Aufwand im Warmwasserbetrieb wird um die aktive Zeit und die Stand-By Zeit im Kühlbetrieb reduziert. Damit ergibt sich die in Tab. 23 dargestellte Methode I der Zuordnung des Aufwandes für Stand-By nach Laufzeit und Grenztemperatur. Mit dem zusätzlichen passiven Kühlbetrieb zeigt sich ein von 206 kWh/a auf 149 kWh/a um 57 kWh/a reduzierter elektrischer Aufwand für Stand-By. Dies entspricht dem elektrischen Aufwand für Regelung, welcher im passiven Kühlbetrieb berücksichtigt ist. Im passiven Kühlbetrieb wird kein Aufwand für Stand-By

registriert. Dies ist begründet in der Tatsache, dass im passiven Kühlbetrieb üblicherweise, und auch hier so betrachtet, eine kontinuierliche Anpassung der Kühlleistung bei durchlaufenden Umwälzpumpen erfolgt. Dadurch wird der gesamte Aufwand als aktiver Betrieb erfasst. Eine reduzierte Erdwärmesondenpumpen-Laufzeit und somit eine Stand-By Phase im passiven Kühlmodus würde eine Differenzierung im passiven Kühlbetrieb erfordern. Hierzu wird vorgeschlagen die Reduktion der Umwälzpumpenlaufzeit in der Aufwandsberechnung für den passiven Kühlbetrieb zu berücksichtigen und im passiven Kühlbetrieb nicht zwischen Stand-By und aktivem Betrieb zu unterscheiden, da die passiv erzeugte Kühlleistung und eine daraus resultierende Laufzeitdifferenzierung sehr spezifisch von den Gebäuderandbedingungen abhängt und nicht so eindeutig unterschieden werden kann wie mit aktivem Wärmepumpenbetrieb.

		SEK3 S/W-WP 75% ME ohne C	SEK3 S/W-WP 75% ME	SEK3 S/W-WP 25% ME
Kälte/Wärme-Verhältnis	$Q_C/(Q_H+Q_W)$	0%	15%	23%
el. Aufwand im Kühlbetrieb total	$E_{C,gen}$	0 kWh/a	246 kWh/a	246 kWh/a
el. Aufwand im Kühlbetrieb für Regelung	$E_{C,gen,ctr}$	0 kWh/a	57 kWh/a	57 kWh/a
Methode I: Zuordnung nach Laufzeit und Grenztemperatur				
el. Aufwand für Stand-By total	$E_{HWC,gen,St}$	206 kWh/a	149 kWh/a	149 kWh/a
el. Aufwand für Stand-By im Heizbetrieb	$E_{H,gen,St}$	112 kWh/a	112 kWh/a	112 kWh/a
el. Aufwand für Stand-By im Warmwasserbetrieb	$E_{W,gen,St}$	94 kWh/a	37 kWh/a	37 kWh/a
el. Aufwand für Stand-By im Kühlbetrieb	$E_{C,gen,St}$	0 kWh/a	0 kWh/a	0 kWh/a

Tab. 23: Allokation des elektrischen Aufwandes für Stand-By nach Laufzeit und Grenztemperaturen

In Tab. 24 als Methode II „Zuordnung gewichtet nach erzeugter Wärme“ dargestellt ist die Methode der Zuordnung des elektrischen Aufwandes für Stand-By gewichtet mit dem Anteil der erzeugten Wärme in den jeweiligen Betriebsmodi bezogen auf die gesamte erzeugte Wärme. Geschieht dies ohne Berücksichtigung der speziellen Charakteristik im passiven Kühlbetrieb, so würde diesem ein zusätzlicher Aufwand von 20 kWh/a respektive 28 kWh/a zugeordnet, obwohl dieser entsprechend dem Anlagenbetrieb schon in der Aufwandsberechnung berücksichtigt wurde. Die Zuordnung gewichtet nach der erzeugten Wärme müsste also insofern adaptiert werden, dass für die Gewichtung nur die beiden Betriebsmodi Heizen und Warmwasserbereitung berücksichtigt werden. Die hieraus resultierende Zuordnung des Aufwandes für Stand-By ist in Tab. 24 als Methode III „adaptierte Zuordnung gewichtet nach erzeugter Wärme“ aufgeführt. Die Verteilungen für die Systemvarianten mit passivem Kühlbetrieb sind nahezu identisch. Für die Verteilung des Stand-By Aufwandes der Systemvariante ohne passiven Kühlbetrieb ergibt sich durch die Energiegewichtung ein erhöhter Stand-By Aufwand für den Heizbetrieb und eine Reduktion des dem Warmwasserbetrieb zugeordneten Aufwandes.

		SEK3 S/W-WP 75% ME ohne C	SEK3 S/W-WP 75% ME	SEK3 S/W-WP 25% ME
Kälte/Wärme-Verhältnis	$Q_C/(Q_H+Q_W)$	0%	15%	23%
el. Aufwand im Kühlbetrieb total	$E_{C,gen}$	0 kWh/a	246 kWh/a	246 kWh/a
el. Aufwand im Kühlbetrieb für Regelung	$E_{C,gen,ctr}$	0 kWh/a	57 kWh/a	57 kWh/a
Methode II: Zuordnung gewichtet nach erzeugter Wärme				
el. Aufwand für Stand-By total	$E_{HWC,gen,St}$	206 kWh/a	149 kWh/a	149 kWh/a
el. Aufwand für Stand-By im Heizbetrieb	$E_{H,gen,St}$	146 kWh/a	91 kWh/a	86 kWh/a
el. Aufwand für Stand-By im Warmwasserbetrieb	$E_{W,gen,St}$	60 kWh/a	38 kWh/a	35 kWh/a
el. Aufwand für Stand-By im Kühlbetrieb	$E_{C,gen,St}$	0 kWh/a	20 kWh/a	28 kWh/a
Methode III: adaptierte Zuordnung gewichtet nach erzeugter Wärme				
el. Aufwand für Stand-By total	$E_{HWC,gen,St}$	206 kWh/a	149 kWh/a	149 kWh/a
el. Aufwand für Stand-By im Heizbetrieb	$E_{H,gen,St}$	146 kWh/a	106 kWh/a	106 kWh/a
el. Aufwand für Stand-By im Warmwasserbetrieb	$E_{W,gen,St}$	60 kWh/a	43 kWh/a	43 kWh/a
el. Aufwand für Stand-By im Kühlbetrieb	$E_{C,gen,St}$	0 kWh/a	0 kWh/a	0 kWh/a

Tab. 24: Allokation des elektrischen Aufwandes für Stand-By gewichtet nach erzeugter Wärme (Nutzenergie)

Tab. 25 zeigt ergänzend die Ergebnisse für eine Zuordnung des Stand-By Aufwandes gewichtet nach dem elektrischen Aufwand, als Methode IV ohne Berücksichtigung der spezifischen Charakteristik des passiven Kühlbetriebs und als Methode V mit Beachtung des im passiven Kühlbetrieb schon berücksichtigten Aufwandes für Regelung und Hilfsaggregate und daraus folgender Festsetzung des Stand-By Aufwandes für den passiven Kühlbetrieb zu Null. Aufgrund des im Heizbetrieb höheren Nutzungsgrades der Wärmepumpe ergibt sich gegenüber der Zuordnung gewichtet nach der erzeugten Wärme eine leichte Verschiebung des Stand-By Aufwandes vom Heizbetrieb zum Warmwasserbetrieb.

		SEK3 S/W-WP 75% ME ohne C	SEK3 S/W-WP 75% ME	SEK3 S/W-WP 25% ME
Kälte/Wärme-Verhältnis	$Q_C/(Q_H+Q_W)$	0%	15%	23%
el. Aufwand im Kühlbetrieb total	$E_{C,gen}$	0 kWh/a	246 kWh/a	246 kWh/a
el. Aufwand im Kühlbetrieb für Regelung	$E_{C,gen,ctr}$	0 kWh/a	57 kWh/a	57 kWh/a
Methode IV: Zuordnung gewichtet nach elektrischem Aufwand				
el. Aufwand für Stand-By total	$E_{HWC,gen,St}$	206 kWh/a	149 kWh/a	149 kWh/a
el. Aufwand für Stand-By im Heizbetrieb	$E_{H,gen,St}$	130 kWh/a	89 kWh/a	89 kWh/a
el. Aufwand für Stand-By im Warmwasserbetrieb	$E_{W,gen,St}$	76 kWh/a	49 kWh/a	49 kWh/a
el. Aufwand für Stand-By im Kühlbetrieb	$E_{C,gen,St}$	0 kWh/a	11 kWh/a	11 kWh/a
Methode V: adaptierte Zuordnung gewichtet nach elektrischem Aufwand				
el. Aufwand für Stand-By total	$E_{HWC,gen,St}$	206 kWh/a	149 kWh/a	149 kWh/a
el. Aufwand für Stand-By im Heizbetrieb	$E_{H,gen,St}$	130 kWh/a	96 kWh/a	97 kWh/a
el. Aufwand für Stand-By im Warmwasserbetrieb	$E_{W,gen,St}$	76 kWh/a	53 kWh/a	52 kWh/a
el. Aufwand für Stand-By im Kühlbetrieb	$E_{C,gen,St}$	0 kWh/a	0 kWh/a	0 kWh/a

Tab. 25: Allokation des elektrischen Aufwandes für Stand-By gewichtet nach elektrischem Aufwand (Endenergie)

Symbolverzeichnis

Symbole

C	Wärmekapazität	[J/K]
CDD	Kühlgradtage	[Kd]
COP	Coefficient of Performance = Leistungszahl	[-]
EBF	Energiebezugsfläche	[m ²]
E _{el}	elektrischer Energiebedarf	[J]
E _C	Energiebedarf für Klimakälte	[MJ/m ² a]
E _H	Energiebedarf für Heizwärme	[MJ/m ² a]
E _W	Energiebedarf für Warmwasserbereitung	[MJ/m ² a]
E _{W,gen}	Energiebedarf zur Wärmeerzeugung von Trinkwarmwasser	[MJ/m ² a]
E _{W,sys}	Energiebedarf des Systems zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser	[MJ/m ² a]
JAZ	Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe	[-]
n	Anzahl	[-]
PPD	predicted percentage of dissatisfied = vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener	[%]
P _{el}	elektrische Leistungsaufnahme	[W]
Q _C	Klimakältebedarf	[MJ/m ² a]
Q _H	Heizwärmebedarf	[MJ/m ² a]
Q _W	Wärmebedarf für Warmwasser	[MJ/m ² a]
Q _{W,gen}	Wärmebedarf zur Erzeugung von Trinkwarmwasser	[MJ/m ² a]
Q _{W,u}	Warmwasser-Nutzwärmebedarf	[MJ/m ² a]
SNG	System-Nutzungsgrad	[-]
t	Laufzeit	[h]
WNG	Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad	[-]
WRG	Wärmerückgewinnungsgrad der Lüftungsanlage	[-]
ZUL	Zuluft	[-]
Φ _{WW}	Heizleistung für Warmwasser	[W]
Θ	Temperatur	[°C]
ΔΘ	Temperaturdifferenz	[K]

Abkürzungen

ABL	Abluft	[-]
AUL	Aussenluft	[-]
EWS	Erdwärmesonde	[-]
FOL	Fortluft	[-]
ME	MINERGIE®	[-]
MEP	MINERGIE-P®	[-]
shd	Verschattung der Fenster	[-]
VRF	Variable Refrigerant Flow / Variabler Kältemittel Massenstrom	[-]
WW	Trinkwarmwasser (alternativ auch Warmwasser verwendet)	[-]

Literaturverzeichnis

- [1] **Reglement zur Nutzung der Qualitätsmarke Minergie® (2009)**; Verein Minergie®, Bern; <http://www.minergie.ch>
- [2] Lederle N., Dott R., Afjei T.; **SEK - Standardlösungen zum energieeffizienten Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen / Feldmessung: Das passive Kühlen und Heizen mit erdgekoppelter Wärmepumpe in einem Einfamilienhaus in Muolen**; Schlussbericht BFE, MuttENZ, Juli 2010
- [3] A. Genkinger, R. Dott, Th. Afjei, A. Witmer; **Sanfte Kühlung mit Erdwärmesonden im Minergie-P® Wohngebäude Cosy Place**, Schlussbericht BFE, MuttENZ, Februar 2010
- [4] Viessmann Schweiz AG, Geschäftsbereich SATAG Thermotechnik:
<http://www.satagthermotechnik.ch/de/Produkte/Kuehlen.html>
- [5] Daikin Europe N.V.: <http://www.daikineurope.com> oder <http://www.altherma.ch>
- [6] Zehnder Comfosystems AG: <http://www.comfosystems.ch> → Produkte → Lüftungsgeräte Comfoair → Artic500
- [7] SN EN 15251:2007; **Bewertungskriterien für den Innenraum einschliesslich Temperatur, Raumluftqualität, Licht und Lärm**; Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA; Zürich; 2007
- [8] SIA 382/1:2007; „**Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen**“; Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA; Zürich; 2007
- [9] SN EN ISO 7730; **Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD- Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005)**; 02-2006; Schweizerische Normen Vereinigung - SNV; Winterthur
- [10] Olesen, B. W. 1997. **Flächenheizung und Kühlung; Einsatzbereiche für Fussboden-, Wand- und Deckensysteme**, Proceedings Velta Congress 97, pp. 35. Norderstedt, Germany
- [11] Afjei T., Dott R., Huber A.; **Heizen und Kühlen mit erdgekoppelten Wärmepumpen**; Schlussbericht Bundesamt für Energie (BFE); Bern; 2007
- [12] Hässig W. et.al.: **Untersuchung zur Lüftung von sanierten Mehrfamilienhäusern**; Amt für Hochbau der Stadt Zürich; Zürich; 2005
- [13] Ganz R.; **Raumluftfeuchte in Wohnbauten**; AWEL - Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kanton Zürich; Zürich; 2007
- [14] MuKE n:2008; **Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich**; Konferenz Kantonaler Energiedirektoren - EnDK; Chur; 2008
- [15] Afjei, Th. et al.; **Calculation method for the seasonal performance of heat pump compact units and validation**; Schlussbericht Bundesamt für Energie (BFE); Bern; 2007
- [16] SIA 384.342:2008; SN EN 15316-4-2; **Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen - Teil 4-2: Wärmeerzeugung für die Raumheizung, Wärmepumpensysteme**; Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA; Zürich; 2008
- [17] EPBD; **RICHTLINIE 2010/31/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung)**; Europäische Union; Brüssel; 2010
- [18] DIN V 18599-5:2007-02; **Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen**; DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Berlin; 2007
- [19] prEN14825:2008; **Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und -kühlung - Prüfung und Leistungsbemessung unter Teillastbedingungen**; CEN; Brüssel; November 2008
- [20] EN 15255:2007; **Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung der wahrnehmbaren Raumkühllast - Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren**; CEN; Brüssel; August 2007
- [21] EN 15265:2007; **Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung des Heiz- und Kühlenergieverbrauchs - Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren**; CEN; Brüssel; August 2007
- [22] EN 15243:2007; **Lüftung von Gebäuden - Berechnung der Raumtemperaturen, der Last und Energie von Gebäuden mit Klimaanlage n**; CEN; Brüssel; Oktober 2007
- [23] Dott R., Afjei T.; **Standard systems for energy efficient heating and cooling with heat pumps**; Proceedings 1st Swiss Building and Urban Simulation Conference IBPSA-CH (bus2009); Luzern; November 2009
- [24] Huber A. and Schuler O. „**Berechnungsmodul für Erdwärmesonden**“, Bundesamt für Energie, Bern, CH, 1997
- [25] SIA2028:2008. **Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik**. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA. Zürich 2008
- [26] SIA2024:2006. **Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik**. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA. Zürich 2006
- [27] Neymark J., Judkoff R.; **International Energy Agency Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method for Heating, Ventilation and Air-Conditioning Equipment Models (HVAC BESTEST)**; IEA SHC Task 22; US-DOE; Golden Colorado; Jan 2002
- [28] SIA 380/1:2001, **Thermische Energie im Hochbau**, 02-2001, SIA, Zürich

Anhang: Rechenbeispiel Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad

Rechenbeispiel Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad für das System SEK3 mit passiver Kühlung über Erdwärmesonde und Fussbodenheizung:

$$\begin{aligned} WNG_H &= \frac{Q_{H,gen}}{E_{H,gen}} = \frac{Q_{H,gen}}{E_{H,compressor} + E_{H,control+auxillaries} + E_{H,Pump / Fan,source}} \\ &= \frac{9372 \text{ kWh}}{(1812 + 143 + 189) \text{ kWh}} = \frac{9372 \text{ kWh}}{2144 \text{ kWh}} = 4.4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} WNG_W &= \frac{Q_{W,gen}}{E_{W,gen}} = \frac{Q_{W,gen}}{E_{W,compressor} + E_{W,control+auxillaries} + E_{W,Pump / Fan,source}} \\ &= \frac{3877 \text{ kWh}}{(924 + 82 + 99) \text{ kWh}} = \frac{3877 \text{ kWh}}{1105 \text{ kWh}} = 3.5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} WNG_C &= \frac{Q_{C,gen}}{E_{C,gen}} = \frac{Q_{C,gen}}{E_{C,compressor} + E_{C,control+auxillaries} + E_{C,Pump / Fan,source}} \\ &= \frac{3106 \text{ kWh}}{(0 + 56 + 185) \text{ kWh}} = \frac{3106 \text{ kWh}}{241 \text{ kWh}} = 12.9 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} WNG_{HWC} &= \frac{Q_{HWC,gen}}{E_{HWC,gen}} = \frac{Q_{H,gen} + Q_{W,gen} + Q_{C,gen}}{E_{H,gen} + E_{W,gen} + E_{C,gen}} \\ &= \frac{(9372 + 3877 + 3106) \text{ kWh}}{(2144 + 1105 + 241) \text{ kWh}} = \frac{16355 \text{ kWh}}{3490 \text{ kWh}} = 4.7 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} WNG_{HWC} &= WNG_H * \frac{E_{H,gen}}{E_{HWC,gen}} + WNG_W * \frac{E_{W,gen}}{E_{HWC,gen}} + WNG_C * \frac{E_{C,gen}}{E_{HWC,gen}} \\ &= 4.4 * \frac{2144 \text{ kWh}}{3490 \text{ kWh}} + 3.5 * \frac{1105 \text{ kWh}}{3490 \text{ kWh}} + 12.9 * \frac{241 \text{ kWh}}{3490 \text{ kWh}} \\ &= 4.4 * 0.61 + 3.5 * 0.32 + 12.9 * 0.07 = 4.7 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} WNG_{HWC} &= \frac{Q_{HWC,gen}}{\frac{Q_{H,gen}}{WNG_H} + \frac{Q_{W,gen}}{WNG_W} + \frac{Q_{C,gen}}{WNG_C}} \\ &= \frac{16355 \text{ kWh}}{\frac{9372 \text{ kWh}}{4.4} + \frac{3877 \text{ kWh}}{3.5} + \frac{3106 \text{ kWh}}{12.9}} = \frac{16355 \text{ kWh}}{3490 \text{ kWh}} = 4.7 \end{aligned}$$

Anhang: Annahmen und Randbedingungen

Die Randbedingungen der Simulationen werden festgelegt in Anlehnung an die aktuelle Normung. Die verwendeten Werte sind im Folgenden dokumentiert.

Behaglichkeit und Klima:

Der Soll – Behaglichkeitsbereich entspricht EN 15251 [7] mit der Kategorie II für die Heizperiode und der Kategorie III für die Kühlperiode. Die Wetterdaten entsprechen dem DRY gemäss SIA 2028 [25] für Basel-Binningen.

Innere Wärmegewinne

Die inneren Wärmegewinne durch Geräte, Beleuchtung und Personen entsprechen den Werten aus dem Merkblatt SIA 2024 [26] mit folgender Zuordnung der Raumtypen aus SIA 2024 zu den Räumen in Abb. 61 bis Abb. 64:

SIA 2024 - Raumtyp	Raumbezeichnung Referenzgebäude
Wohnen	Wohnzimmer, Zimmer 1, Zimmer 2, Zimmer 3, Flur, Treppe, Waschraum, Bad
Küche	Küche

Verschattung

Oberhalb einer Raumlufthtemperatur von 23°C werden alle Fenster, wie in Abb. 52 dargestellt, je nach Variante zu 25%, 50% oder 75% verschattet.

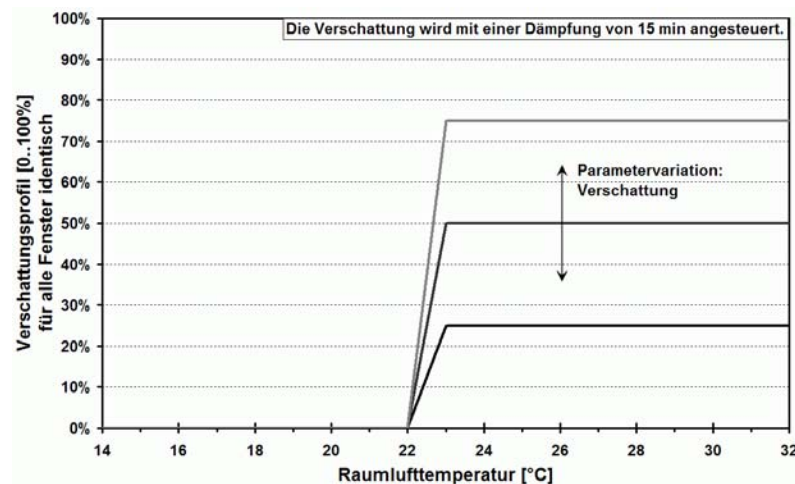


Abb. 52: Verschattungsfahrplan in drei Varianten abhängig von der Raumlufthtemperatur

Lüftung

Die mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung ist mit einem Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung in der Lüftung von 80% abgebildet. Der Luftwechsel beträgt 0.4 1/h, der thermisch wirksame Aussenluftvolumenstrom mit WRG 0.28 m³/m²h. Die mechanische Lüftung wird im Winter mit und im Sommer ohne WRG betrieben. Eine passive Luftkühlung erhöht den Luftwechsel auf 1/h, wenn die mittlere Raumlufthtemperatur der vier Zonen einerseits mindestens 2 K über der Aussenlufttemperatur liegt und andererseits oberhalb einer Raumlufthtemperatur von 23 °C.

Heizen

Die Freigabe zum Heizen erfolgt bei einer gleitend über 24 Stunden gemittelten Aussenluft-Temperatur $< 12^{\circ}\text{C}$.

Bei Verwendung einer Fussbodenheizung als Wärmeübergabesystem hat die Rücklauf-Heizkurve, dargestellt in Abb. 53, für das Minergie®-Gebäude (ME) eine Auslegungstemperaturpaarung Vorlauf / Rücklauf von $33^{\circ}\text{C} / 28^{\circ}\text{C}$ bei einer Aussentemperatur von -8°C und eine Fusspunktverschiebung von 0K und für das Minergie-P®-Gebäude (ME-P) eine Auslegungstemperaturpaarung von $32^{\circ}\text{C} / 27^{\circ}\text{C}$ bei -8°C . Die Soll-Raumtemperatur der Variante mit VRF-Multi-Split-Luft/Luft-Wärmepumpe ist auf 21°C eingestellt.

Kühlen

Die Freigabe zum Kühlen erfolgt bei einer gleitend über 24 Stunden gemittelten Aussenluft-Temperatur $> 17^{\circ}\text{C}$

Bei Verwendung einer Fussbodenheizung als Wärmeübergabesystem wird eine Rücklauf-Kühlkurve mit einer konstanten Soll-Temperatur von 22°C angewendet. Die Soll-Raumtemperatur der Variante mit VRF-Multi-Split-Luft/Luft-Wärmepumpe ist zur Realisierung einer vergleichbaren Variante auf 24.5°C eingestellt.

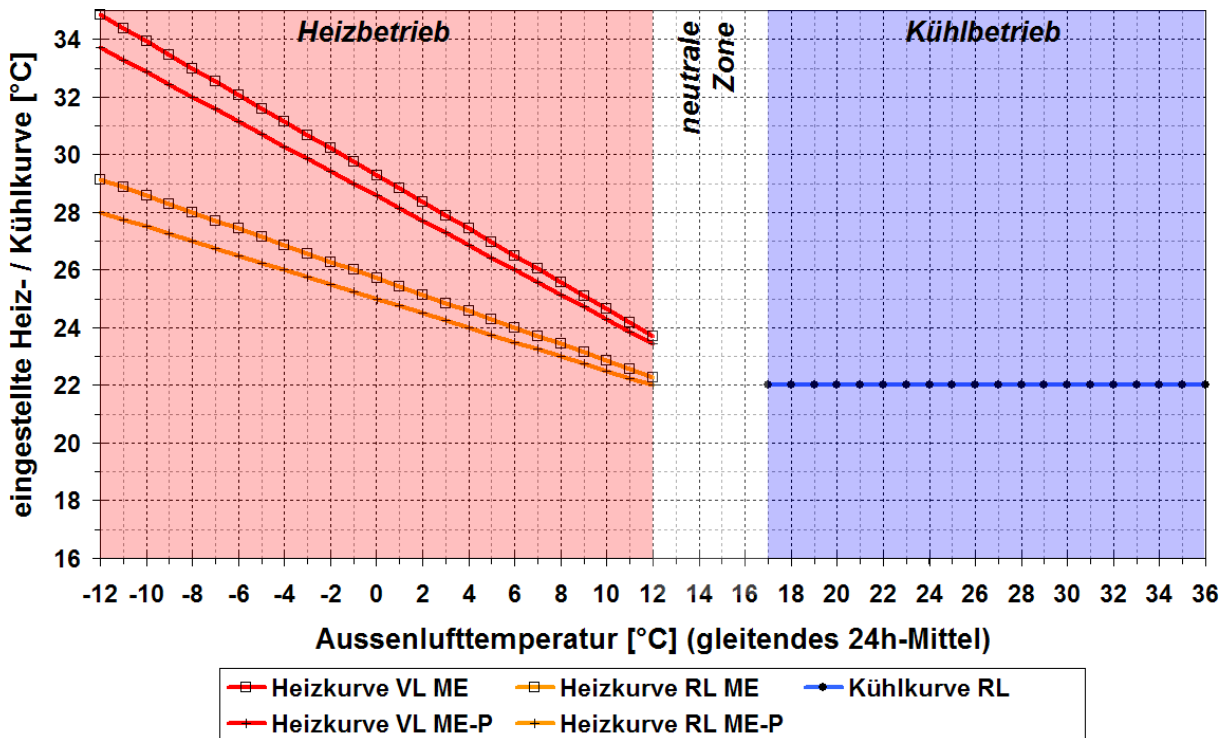


Abb. 53: Heiz- & Kühlkurven für das Referenzgebäude

Stand-By Aufwand

Der Stand-By Aufwand wird gemäss der Heiz- / Kühlgrenze den Betriebsarten h,w,c zugeordnet. Liegt die Aussenluft-Temperatur unterhalb der Heizgrenze, $T_{\text{AUL}} < T_{\text{h,Grenz}}$, dann wird der Stand-By Aufwand dem Heizbetrieb zugeordnet; liegt sie oberhalb der Kühlgrenze, $T_{\text{AUL}} > T_{\text{c,Grenz}}$, dann dem Kühlbetrieb; liegt sie zwischen Heiz- und Kühlgrenze, dann dem Warmwasser-Betrieb.

SEK1

Das Standardsystem SEK1 besteht aus zwei Wärmepumpen-Systemen, einem invertergeregelten VRF-Multi-Split-System für Heizen und Kühlen sowie einem Abluft- Wärmepumpenboiler zur Warmwasserbereitung, welcher der Wärmerückgewinnung in der Lüftungsanlage nachgeschaltet ist.

Invertergeregeltes Multi-Split VRF System

Kältemittel: R410A

Innengeräte:

Invertergeregeltes Truhengerät je Raum mit einer Heizleistung < 3.0 kW und einer Kühlleistung < 2.5 kW

Aussengerät

Nenn-Heizleistung: 8.0 kW bei: Aussen: 7 °C_{TK} (6 °C_{FK}) / Innen: 20 °C_{TK} (15.5 °C_{FK})
Regelbereich: 20% - 100% Kennfeld siehe Abb. 55

Nenn-Kühlleistung: 7.0 kW bei: Aussen: 35 °C_{TK} (24 °C_{FK}) / Innen: 27 °C_{TK} (19 °C_{FK})
Regelbereich: 20% - 100% Kennfeld siehe Abb. 56

Das Teillastverhalten beschrieben mit Gl.1 und Abb. 54 wird entsprechend HVAC BESTEST [27] angesetzt.

$$COP(PLR) = COP(PLR = 1) * CDF(PLR) \quad \text{Gl.1}$$

mit :

$$CDF = 1 - 0.229 * (1 - PLR) \quad \& \quad PLR = \frac{\Phi_{HC}}{\Phi_{HC,nom}}$$

COP	Leistungszahl des Wärmepumpenherstellers	[-]
PLR	Part Load Ratio, Teillastverhältnis der Ausseneinheit, 0 ≤ PLR ≤ 1	[-]
CDF	COP Degradation Factor, Teillastfaktor der Leistungszahl	[-]
Φ_{HC}	Wärmeleistung der Ausseneinheit	[kW]
$\Phi_{HC,nom}$	nominale Wärmeleistung der Ausseneinheit	[kW]

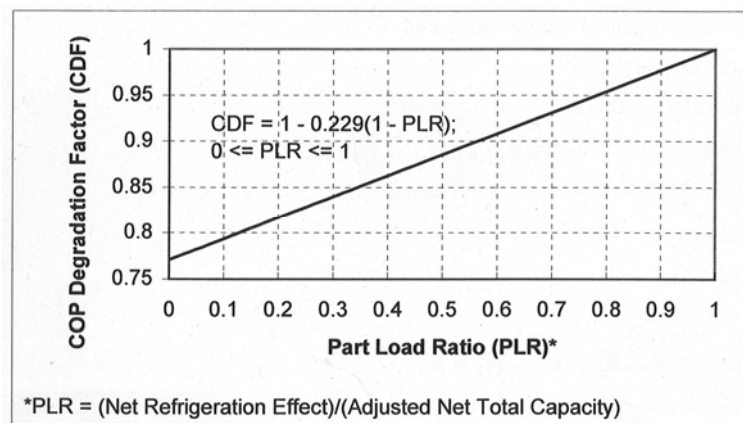


Abb. 54: Teillastverhalten der Leistungszahl für System SEK1

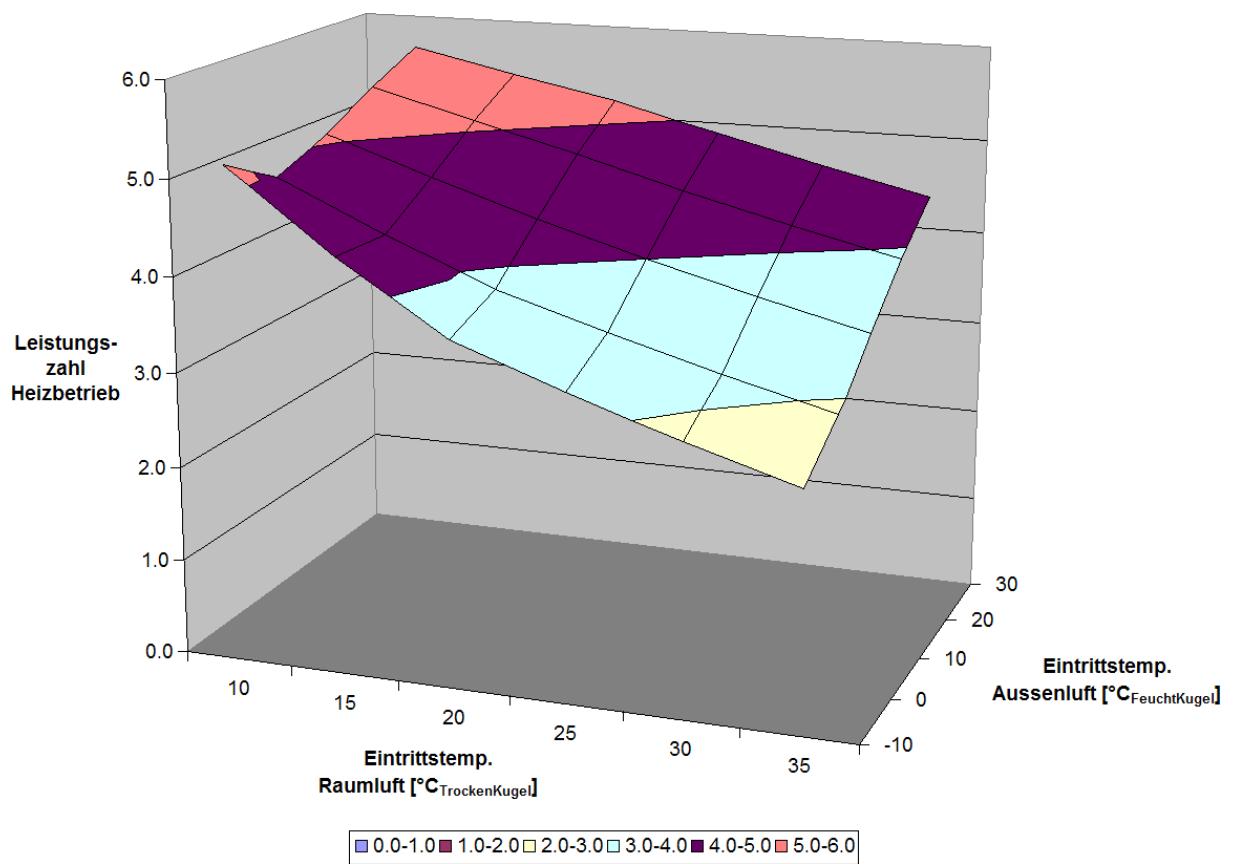


Abb. 55: Leistungszahl-Kennfeld SEK1 im Heizbetrieb

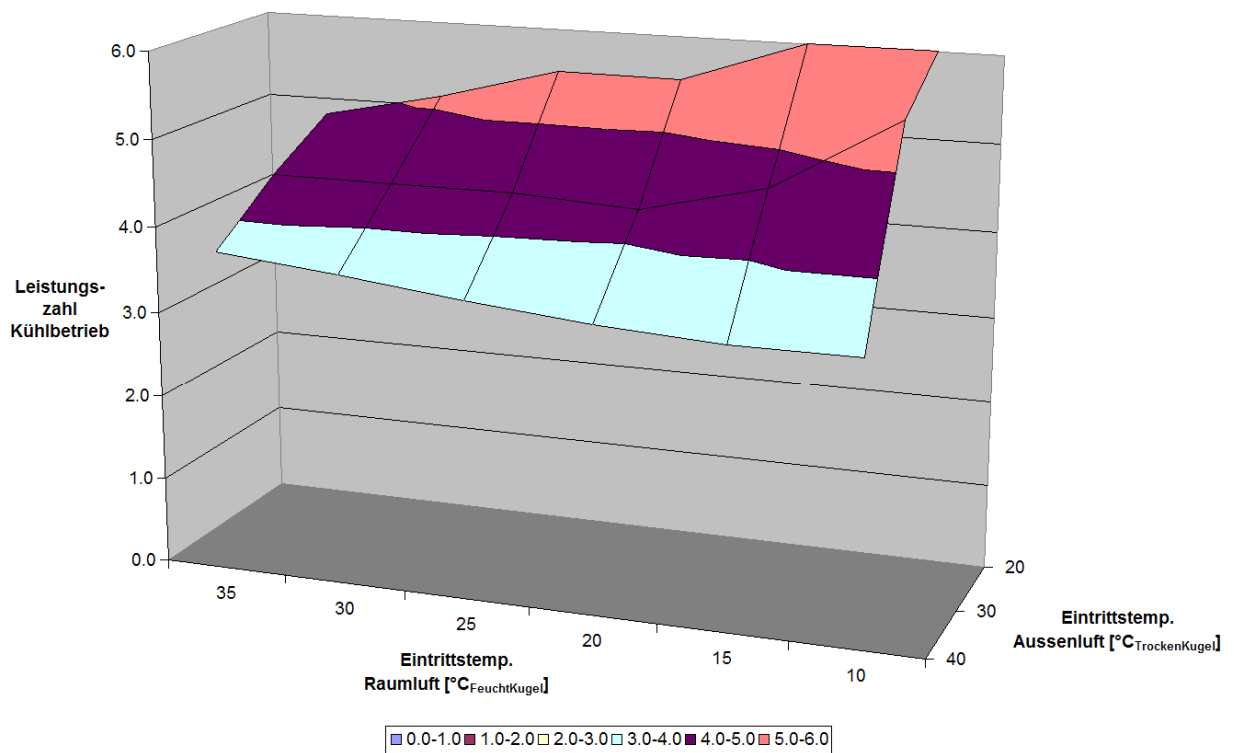


Abb. 56: Leistungszahl-Kennfeld SEK1 im Kühlbetrieb

Abluft-Wärmepumpenboiler

Kältemittel: R134A

Nenn-Wärmeleistung: 1.5 kW Leistungszahl: 3,5
bei Warmwasserbereitung von 15 °C auf 45 °C und Lufttemperatur 15 °C

SEK2

Das Standard-System SEK2 verwendet eine Standard Luft/Wasser-Heizwärmepumpe für Heizen und Warmwasserbereitung welche im Umkehrbetrieb für die Raumkühlung eingesetzt wird.

Kältemittel: R407C

Heizleistung (A-7/W35): 6.6 kW Regelbereich: ein / aus Kennfeld siehe Abb. 57
Kühlleistung (A35/W20): 9.7 kW Regelbereich: ein / aus Kennfeld siehe Abb. 58

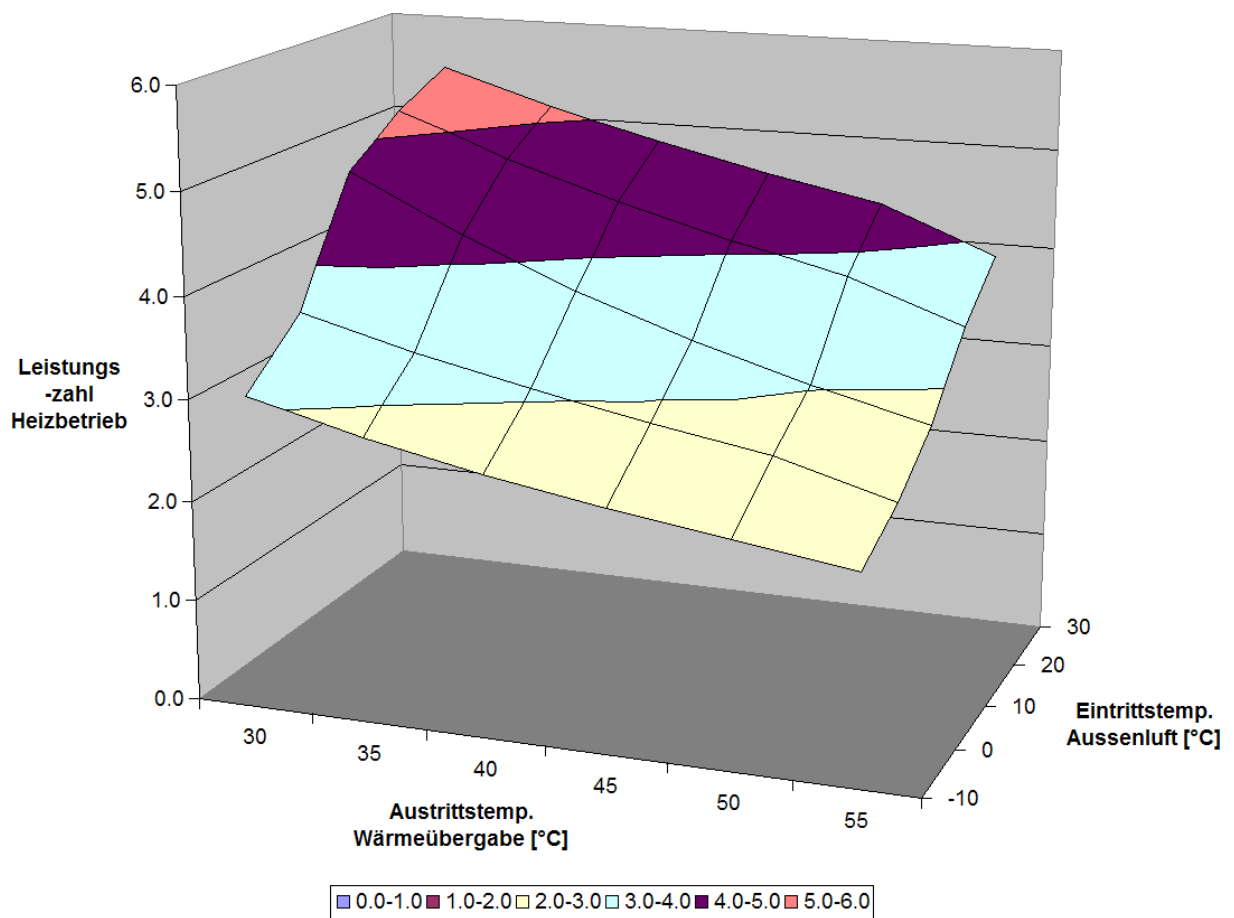


Abb. 57: Leistungszahl-Kennfeld SEK2 im Heizbetrieb

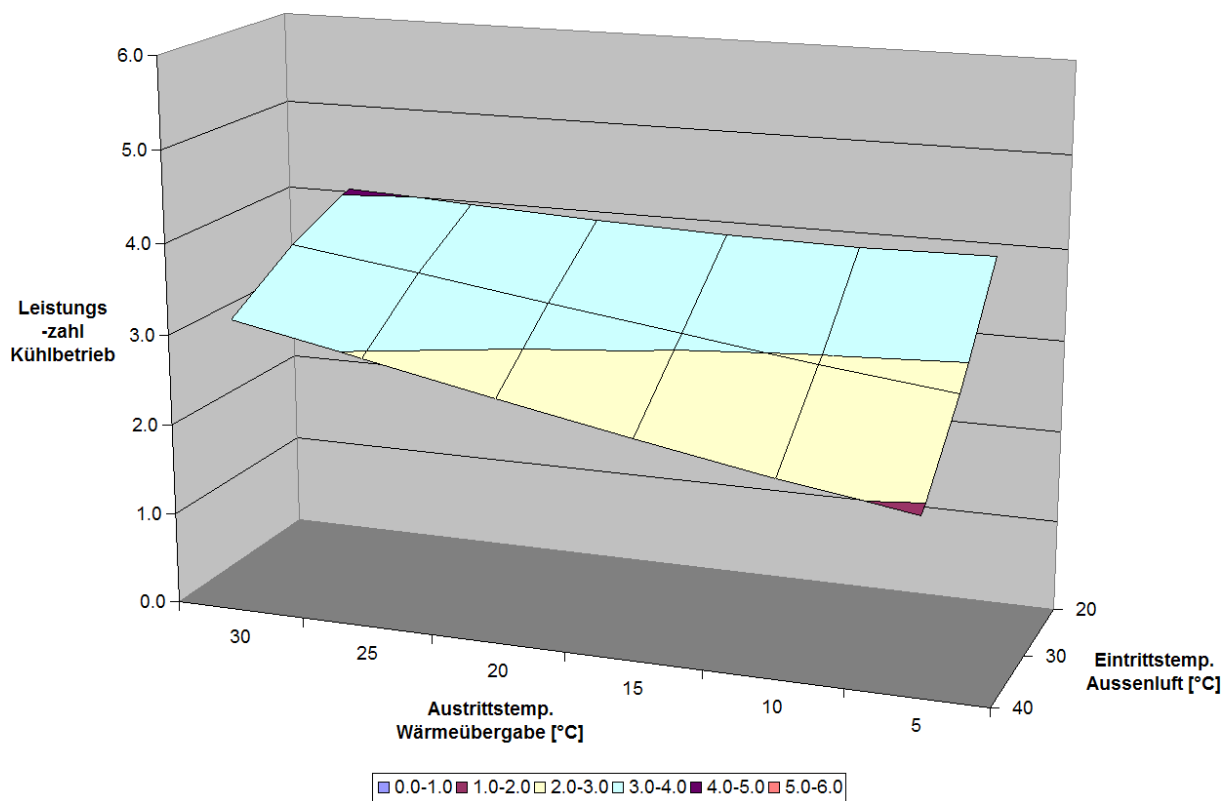


Abb. 58: Leistungszahl-Kennfeld SEK2 im Kühlbetrieb

SEK3

Das Standard-System SEK3 verwendet eine Standard Sole/Wasser-Heizwärmepumpe für Heizen und Warmwasserbereitung mit integrierten Umwälzpumpen. Die Raumkühlung erfolgt über die Kopplung von Erdwärmesonde und Fussbodenheizung im passiven Kühlbetrieb.

Passive Kühlung

Der Kälteerzeuger zur Raumkühlung ist für die passive Kühlung mit System SEK3 auf eine Leistung 5 kW begrenzt. Diese Begrenzung ist bedingt durch die separate Abbildung des Gebäudeverhaltens und des Sondenverhaltens in verschiedenen Simulationsprogrammen. Da in der Gebäudesimulation die Erdwärmesonde nicht abgebildet ist, muss eine maximale Leistung des Kälteerzeugers abgeschätzt werden. Für die hier betrachteten Varianten ist dies für die passive Kühlung die Kälteleistung der Erdwärmesonde und für den kombinierten Warmwasserbetrieb die Verdampferleistung der Wärmepumpe. Im passiven Kühlbetrieb mit der Erdwärmesonde wird für den Wärmetauscher zwischen Erdwärmesonden- und Fussbodenkreis eine Grädigkeit von 1 K angesetzt. Die Übereinstimmung der Annahme mit dem Ergebnis der Erdwärmesonden-Simulation wird jeweils überprüft und falls notwendig angepasst.

Wärmepumpe

Kältemittel: R407C

Heizleistung (B0/W35): 6.2 kW

Regelbereich: ein / aus

Kennfeld siehe Abb. 59

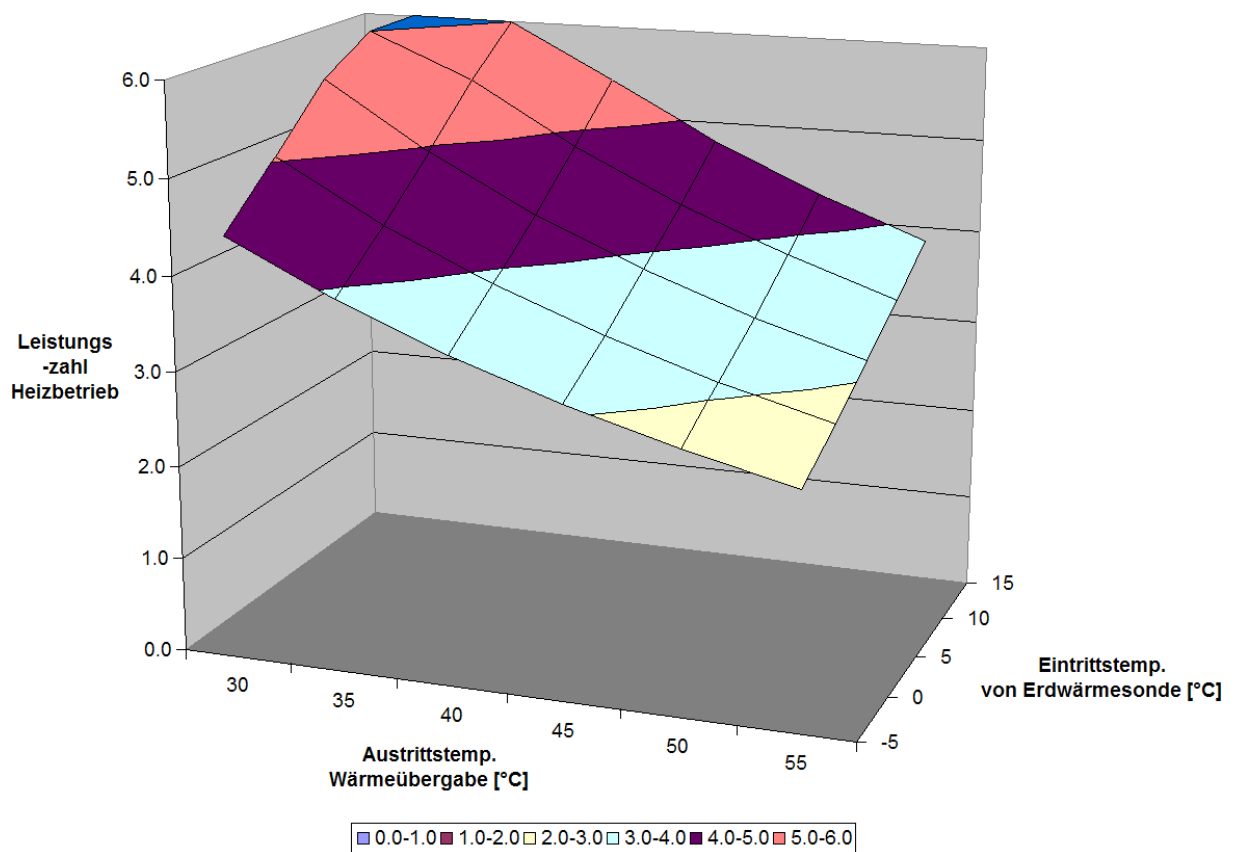


Abb. 59: Leistungszahl-Kennfeld SEK3 im Heizbetrieb

Erdwärmesonde

Es wird eine PE100 Duplex-Erdwärmesonde mit folgenden Annahmen in der Modellierung verwendet:

Länge: 100 m / Rohrdurchmesser: 32 mm / Wandstärke: 3 mm / Bohrdurchmesser: 120 mm

Das Erdreich für den Klimadaten-Standort Basel-Binningen wird mit folgenden Annahmen berechnet:

ungestörte Erdreich-Temperatur: 10 °C / Temperaturgradient 0.04 K/m

Wärmeleitfähigkeit: 2.6 W/mK / Dichte: 2600 kg/m³ / Wärmekapazität: 1000 J/kgK

Referenzgebäude

Als Referenzgebäude wurde ein für die Schweiz typisches Einfamilienhaus mit einer Energiebezugsfläche von 200 m² definiert. Das massiv erstellte Gebäude besteht aus zwei Stockwerken mit Flachdach bei einem quadratischen Grundriss. Für die Simulationen wird der normale Klimadatensatz der Station Basel-Binningen gemäss SIA2028 (SIA2028 2008) verwendet.

Das Gebäude entspricht in zwei Ausführungen den Anforderungen nach Minergie® bzw. Minergie-P® 2009. Die Grundrisse für das Minergie® Gebäude sind in Abb. 61 (Erdgeschoss) und Abb. 62 (Obergeschoss) dargestellt. Die Grundrisse für das Minergie-P® Gebäude sind in Abb. 63 (Erdgeschoss) und Abb. 64 (Obergeschoss) dargestellt.

Die Wandkonstruktionen der beiden Gebäude sind nahezu identisch, einzig die Isolationsstärke im Dach und in der Aussenwand wurden für das Minergie-P® Gebäude gegenüber dem Minergie® Gebäude erhöht. Die für die thermischen Eigenschaften relevanten Grössen sind in Tab.1 für das Minergie® Referenzgebäude und in Tab.2 für das Minergie-P® Referenzgebäude aufgeführt.

Im gesamten Gebäude kommen zur Vereinfachung der Berechnung nur zwei unterschiedliche Fenstertypen zur Anwendung, welche bis auf die Höhe identisch sind. Beides sind zweiflüglige, öffnbare Fenster (siehe Abb. 60), wobei der eine Typ ein halbhohes Fenster ist, und der zweite Fenstertyp ein bodentiefes Fenster. In den Grundriss-Darstellungen Abb. 61 bis Abb. 64 sind die halbhohen Fenster mit einer einzelnen Linie (|=====|) dargestellt, die bodentiefen Fenster mit einer doppelten Linie (|=====|).

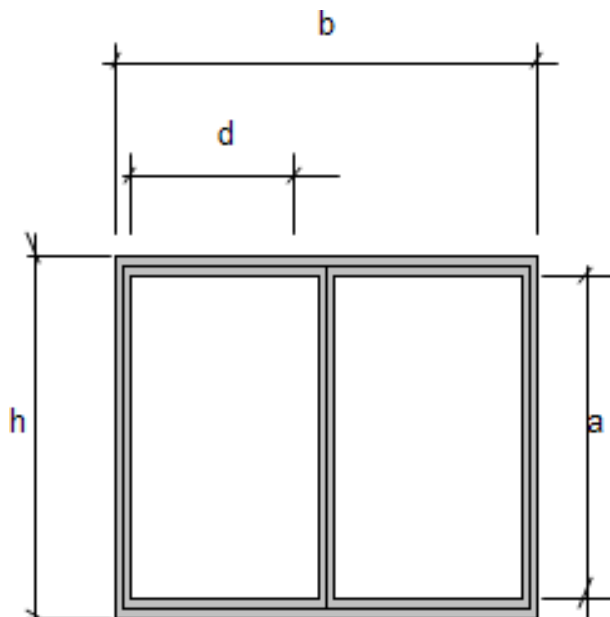


Abb. 60: Ansicht und Bemessung der Fenstertypen

Die Fenster werden zu 75% verschattet, wenn die Raumlufthtemperatur 23 °C übersteigt. Weiterhin wird der Luftwechsel von 0.4 h⁻¹ auf 1 h⁻¹ erhöht, wenn die Raumlufthtemperatur 25°C übersteigt und mindestens 2 K höher ist als die Aussenlufttemperatur.

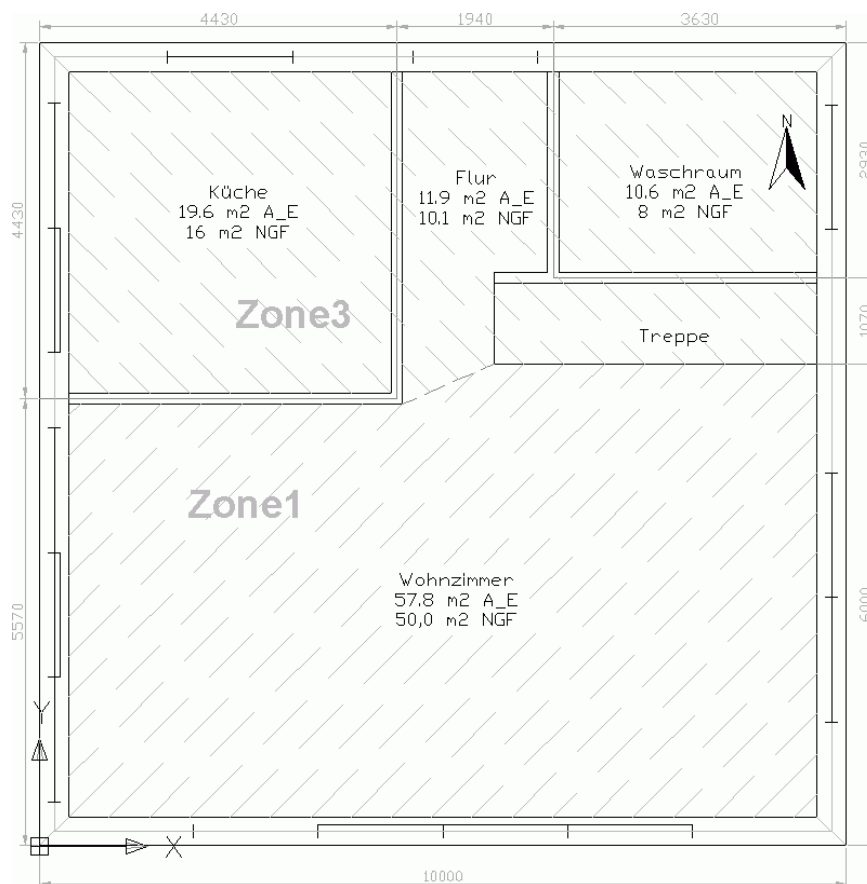


Abb. 61: Grundriss des Minergie® Referenzgebäudes für das Erdgeschoss

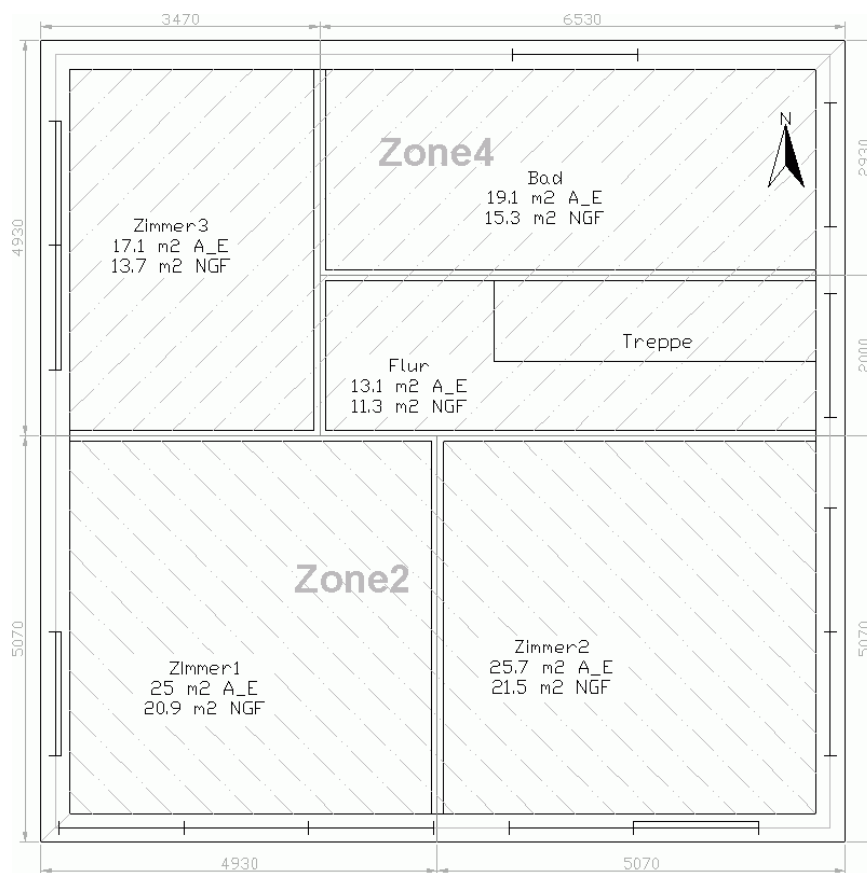


Abb. 62: Grundriss des Minergie® Referenzgebäudes für das Obergeschoss

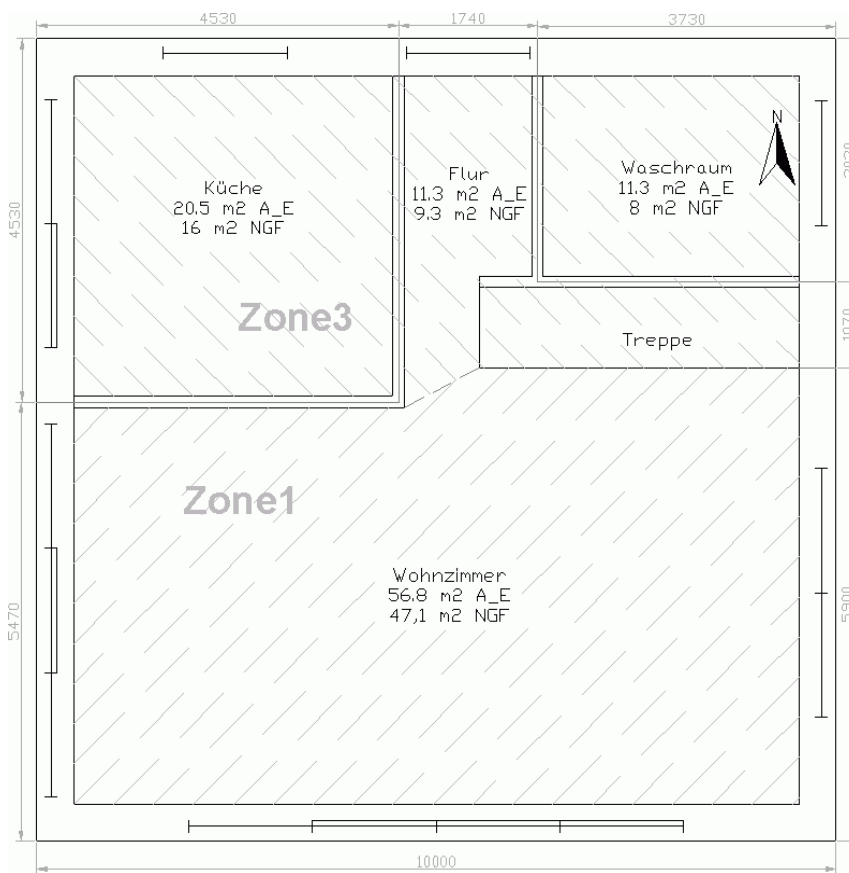


Abb. 63: Grundriss des Minergie-P® Referenzgebäudes für das Erdgeschoss

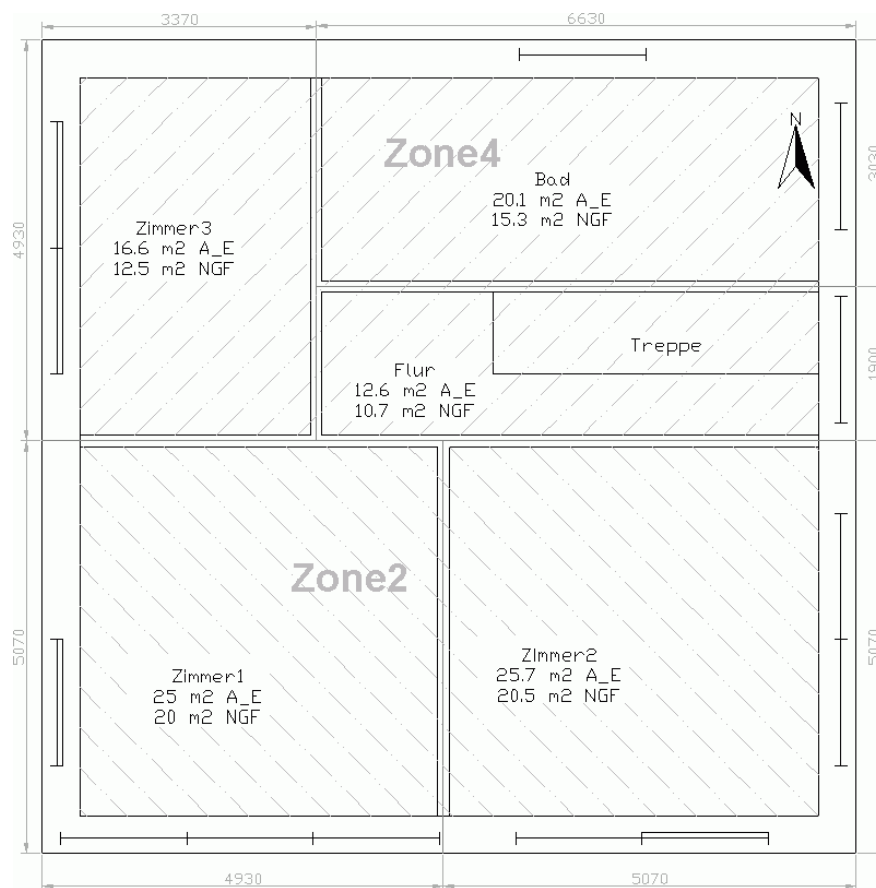


Abb. 64: Grundriss des Minergie-P® Referenzgebäudes für das Obergeschoss

Im Folgenden sind die Masse und thermischen Eigenschaften der Fenster aufgeführt:

halbhohes Fenster, (obere Hälfte der Wand)

Fenstergrösse:	Breite (b): 1.55 m	Höhe (h): 1.15 m
Glasgrösse:	Breite (d): 0.68 m (2*)	Höhe (a): 1.00 m
Glasfläche:	1.360 m ²	
Rahmenfläche:	0.423 m ²	
Fensterfläche:	1.783 m ²	
Rahmenanteil:	24%	
U-Wert des Rahmens:	1.10 W/m ² /K	
Ψ-Wert des Fensters:	0.05 W/m/K (Randverbund)	

Minergie® Gebäude:

U-Wert des Glases:	1.10 W/m ² /K	U-Wert des Fensters:	1.29 W/m ² /K
g-Wert:	0.60	τ _e -Wert:	0.50

Minergie-P® Gebäude:

U-Wert des Glases:	1.00 W/m ² /K	U-Wert des Fensters:	1.21 W/m ² /K
g-Wert:	0.55	τ _e -Wert:	0.45

bodentiefe Fenster, (ganze Wandhöhe)

Fenstergrösse:	Breite (b): 1.55 m	Höhe (h): 2.15 m
Glasgrösse:	Breite (d): 0.68 m (2*)	Höhe (a): 2.00 m
Glasfläche:	2.720 m ²	
Rahmenfläche:	0.613 m ²	
Fensterfläche:	3.333 m ²	
Rahmenanteil:	18%	
U-Wert des Rahmens:	1.10 W/m ² /K	
Ψ-Wert des Fensters:	0.05 W/m/K (Randverbund)	

Minergie® Gebäude:

U-Wert des Glases:	1.10 W/m ² /K	U-Wert des Fensters:	1.26 W/m ² /K
g-Wert:	0.60	τ _e -Wert:	0.50

Minergie-P® Gebäude:

U-Wert des Glases:	1.00 W/m ² /K	U-Wert des Fensters:	1.18 W/m ² /K
g-Wert:	0.55	τ _e -Wert:	0.45

Beschreibung	Dicke	Wärme- leitfähigkeit	Dichte	Wärme- kapazität	Wärmedurchgang skoeffizient
Symbol	d	λ	ρ	C	u-Wert
Einheit	m	W/m/K	kg/m ³	Wh/m ² /K	W/m ² /K
Aussenwand	0.26				0.28
Gipsputz	0.01	0.70	1400	0.28 Wh/kg/K	
Hochlochziegel	0.15	0.35	1100	0.28 Wh/kg/K	
EPS	0.10	0.034	15	0.39 Wh/kg/K	
Innenwand	0.14				1.61
Gipsputz	0.01	0.70	1400	0.28 Wh/kg/K	
Hochlochziegel	0.12	0.35	1100	0.28 Wh/kg/K	
Gipsputz	0.01	0.70	1400	0.28 Wh/kg/K	
Innendecke	0.32				0.69
Holzzement- boden	0.02	0.13	600	0.58 Wh/kg/K	
Estrich	0.08	1.40	2000	0.21 Wh/kg/K	
EPS	0.04	0.046	40	0.21 Wh/kg/K	
Beton	0.18	1.48	2400	0.28 Wh/kg/K	
Dach	0.39				0.26
Gipsputz	0.01	0.70	1400	0.28 Wh/kg/K	
Beton	0.24	1.48	2400	0.28 Wh/kg/K	
PUR	0.14	0.040	40	0.21 Wh/kg/K	
Bodenplatte	0.48				0.15
Holzzementbod en	0.02	0.13	600	0.58 Wh/kg/K	
Estrich	0.08	1.40	2000	0.21 Wh/kg/K	
Gonon go-PF	0.08	0.022	40	0.21 Wh/kg/K	
Beton	0.20	1.48	2400	0.28 Wh/kg/K	
Isoquick (EPS)	0.10	0.038	40	0.21 Wh/kg/K	
Fenster		g=0.60		$\tau_e=0.50$	1.29 / 1.26
Eingangstüre					0.90

Tab.1: Wandkonstruktionen des Minergie® Referenz Gebäudes

Beschreibung	Dicke	Wärme- leitfähigkeit	Dichte	Wärme- kapazität	Wärmedurchgang skoeffizient
Symbol	d	λ	ρ	C	u-Wert
Einheit	m	W/m/K	kg/m ³	Wh/m ² /K	W/m ² /K
Aussenwand	0.36				0.15
Gipsputz	0.01	0.70	1400	0.28 Wh/kg/K	
Hochlochziegel	0.15	0.35	1100	0.28 Wh/kg/K	
EPS	0.20	0.034	15	0.39 Wh/kg/K	
Innenwand	0.14				1.61
Gipsputz	0.01	0.70	1400	0.28 Wh/kg/K	
Hochlochziegel	0.12	0.35	1100	0.28 Wh/kg/K	
Gipsputz	0.01	0.70	1400	0.28 Wh/kg/K	
Innendecke	0.32				0.69
Holzzement- boden	0.02	0.13	600	0.58 Wh/kg/K	
Estrich	0.08	1.40	2000	0.21 Wh/kg/K	
EPS	0.04	0.046	40	0.21 Wh/kg/K	
Beton	0.18	1.48	2400	0.28 Wh/kg/K	
Dach	0.45				0.15
Gipsputz	0.01	0.70	1400	0.28 Wh/kg/K	
Beton	0.24	1.48	2400	0.28 Wh/kg/K	
PUR	0.20	0.032	40	0.21 Wh/kg/K	
Bodenplatte	0.48				0.15
Holzzementbod en	0.02	0.13	600	0.58 Wh/kg/K	
Estrich	0.08	1.40	2000	0.21 Wh/kg/K	
Gonon go-PF	0.08	0.022	40	0.21 Wh/kg/K	
Beton	0.20	1.48	2400	0.28 Wh/kg/K	
Isoquick (EPS)	0.10	0.038	40	0.21 Wh/kg/K	
Fenster		g=0.55		$\tau_e=0.45$	1.21 / 1.18
Eingangstüre					0.90

Tab.2: Wandkonstruktionen des Minergie-P® Referenz Gebäudes

Trinkwarmwasser

In allen Varianten identisch ist der Betrieb der Wärmepumpe für Warmwasserbereitung abgebildet. Dazu wird in der Gebäudesimulation die Gebäudebeheizung zwischen 1.00 Uhr und 3.00 Uhr in der Nacht unterbrochen und angenommen, dass die Nachtladung des Warmwasserspeichers für den Tag ausreicht. In der Systembetrachtung und -simulation wird der Warmwasser-Wärmebedarf gemäss SIA380/1 [28] angesetzt. Hinzugerechnet wird der Wärmeverlust des Warmwasserspeichers mit 300 Litern Speichervolumen, welcher entsprechend DIN V 18599-5 T5 (Gl. 49) [18] angesetzt wird. Im Systemvergleich wird die Warmwasserbereitung mit dem spezifischen Wärmepumpen-Kennfeld des jeweiligen Systems berechnet. Dabei wird auf eine detaillierte Abbildung des Warmwasserspeichers verzichtet. Der Wirkungsgrad der Wärmepumpe und damit der elektrische Aufwand werden in einer quasistationären Betrachtung in 15-Minuten Schritten mit einer konstanten, mittleren Vorlauf-Temperatur der Wärmepumpe im Warmwasserbetrieb von $\theta_{W,su} = 45^\circ\text{C}$ und der jeweiligen dynamischen Quelltemperatur berechnet.

Warmwasser – Nutzwärmebedarf:

$$Q_{W,u} = 50 \text{ MJ/m}^2/\text{a} = 10'000 \text{ MJ/a} = 2777 \text{ kWh/a} = 27.4 \text{ MJ/d} = 7.6 \text{ kWh/d}$$

Bei einer angesetzten mittleren Belegung des Referenzhauses mit 3.5 Personen beträgt der spezifische Warmwasser-Wärmebedarf $Q_W = 2.2 \text{ kWh/Pers./d} = 793 \text{ kWh/Pers./a}$.

Weiterhin beträgt, bei einer angenommenen Kaltwasser-Temperatur von $\theta_{cw} = 10^\circ\text{C}$ und einer Warmwasser-Zapftemperatur von $\theta_W = 55^\circ\text{C}$, der Warmwasserbedarf $V_W = 41.6 \text{ L/Pers./d}$.

Wärmeverluste des Warmwasserspeichers

$$\begin{aligned} Q_{h,s} &= f_{\text{Verbindung}} \cdot (\theta_{h,s} - \theta_i) / 45^\circ\text{C} \cdot d_{h,a} \cdot q_{B,S} \quad \text{mit} \quad q_{B,S} = 0.4 + 0.14 \cdot V^{0.5} \\ &= 1.2 \cdot (55^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) / 45^\circ\text{C} \cdot 365\text{d} \cdot (0.4 + 0.14 \cdot 300^{0.5}) \text{ kWh/d} \\ &= 1.2 \cdot 0.8889 \cdot 365\text{d} \cdot 2.82 \text{ kWh/d} = 3.0 \text{ kWh/d} \cdot 365\text{d} = 1100 \text{ kWh/a} \end{aligned}$$

Warmwasser-Heizwärmebedarf

Der Warmwasser-Heizwärmebedarf entspricht der Summe aus dem Warmwasser-Nutzwärmebedarf und den Wärmeverlusten des Warmwasserspeichers.

$$Q_{W,\text{gen}} = Q_{W,u} + Q_{h,s} = 2777 \text{ kWh/a} + 1100 \text{ kWh/a} = 3877 \text{ kWh/a}$$