

Verbundprojekt Energie Optimiertes Bauen (EnOB)
Thematischer Verbund LowEx

EnBau – Bauphysik, thermischer Komfort und Energieeffizienz unter exergetischen Gesichtspunkten

Förderkennzeichen 0335007P

Autoren: Doreen Kalz, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE
Jens Pfafferott, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE
Sebastian Herkel, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE

Ansprechpartner PTJ: Dipl.-Ing. Jürgen Gehrman, Dipl.-Ing. Rolf Stricker

40. Ausgabe, März 2010

EnBau – Bauphysik, thermischer Komfort und Energieeffizienz unter exergetischen Gesichtspunkten

Doreen Kalz, Jens Pfafferott und Sebastian Herkel
Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstr. 2, D-79110 Freiburg
E-Mail: doreen.kalz@ise.fraunhofer.de, <http://www.ise.fraunhofer.de>

1 Einleitung

Niedrigenergiegebäude mit einem energieoptimierten Gesamtkonzept aus Architektur, Bauphysik und Gebäudetechnik weisen einen geringen Heiz- und Kühlbedarf auf. Sie können somit bei vergleichbarem Arbeitsplatzkomfort auf eine Vollklimatisierung und den Einsatz von Kältemaschinen zu Gunsten von Umweltenergie aus dem Erdreich, dem Grundwasser oder der Außenluft verzichten. Diesem Trend folgend rücken wassergeführte thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) in die engere Auswahl von Architekten und Ingenieuren, welche die Gebäudestruktur und die Speicherfähigkeit der Bauteile aktiv in das Energiemanagement des Gebäudes mit einbeziehen. Der Wunsch nach einem komfortablen Raumklima verbunden mit der Forderung nach einem möglichst geringen Energieverbrauch und einer verbreiteten Skepsis gegenüber Klimaanlage unterstützen diese Entwicklung. Im Jahr 2007 wurden allein in Deutschland rund 845.000 m² thermisch aktivierbare Flächen neu installiert. Knapp 60% der Büroneubauten werden im Sommer über TABS gekühlt – und teilweise im Winter geheizt. Dabei teilen sich Betonkernaktivierung und Kühldecken zu etwa gleichen Teilen den Markt. Auch in der Sanierung finden thermoaktive Bauteilsysteme immer mehr Anwendung.

2 Gebäudevorstellung

Die hier vorgestellten Ergebnisse zu Energieeffizienz und Raumkomfort von Heiz- und Kühlkonzepten mit TABS und Umweltenergie basieren auf mehrjährigen Monitoringkampagnen in Nichtwohngebäuden aus dem Förderprogramm EnOB „Energieoptimiertes Bauen“ des BMWi ([EnOB 2009], [EnSan 2009]). Alle Demonstrationsgebäude werden in einer hohen Messwertauflösung hinsichtlich des Energiebezugs und der Energieeffizienz für Heizen, Kühlen und Lüften einschließlich des thermischen Raumkomforts und des Außenklimas intensiv vermessen. Die Gebäude weisen unterschiedliche architektonische und planerische Ansätze auf; allen gemein ist jedoch die deutliche Reduzierung des Primärenergiebezugs für die technische Gebäudeausrüstung und die Beleuchtung unter einen Grenzwert von $100 \text{ kWh}_{\text{prim}}/(\text{m}^2_{\text{NGFA}})$ - und damit liegen sie bis um einen Faktor 3 geringer als im heute typischen Nichtwohnungsbau. Ermöglicht wird dieser Zielwert durch eine hochwertige und dichte Gebäudehülle, konsequent begrenzte solare Lasten (Sonnenschutzsysteme), effektive hygienische Lüftung, ausreichend thermische Gebäudespeicherkapazität und reduzierte interne Lasten (effiziente Bürogeräte, Tageslichtnutzung). Des Weiteren sind thermoaktive Bauteilsysteme in Kombination mit natürlichen Umweltenergiequellen bzw. -senken im Heiz- als auch im Kühlfall ein zentraler Bestandteil des Energieversorgungskonzeptes.

3 Ganzheitliche Bewertungsmethodik der Heiz- und Kühlkonzepte

Die Effizienz- und Komfortanalyse basiert auf vier definierten Bilanzgrenzen (I bis IV), um den direkten Vergleich der verschiedenen Energie- und Gebäudekonzepte zu ermöglichen (Abbildung 1):

- I: Umweltenergie aus Grundwasser, Erdreich oder Außenluft
- II: Wärmetauscher (Kühlfall) und Sole-Wasser-Wärmepumpensystem (Heizfall)
- III: thermische Speicherung und Wärme- und Kälteenergieverteilung im Gebäude
- IV: Wärme- und Kälteübergabe im Raum mittels TABS und maschineller Lüftungsanlage

Jede Bilanzgrenze berücksichtigt den elektrischen Hilfsenergieeinsatz für die Erzeugung, Verteilung und Übergabe von Wärme- und Kälteenergie (Betrieb von Pumpen). Der Primärenergieaufwand wird mit den Primärenergiefaktoren für die folgenden Energieträger bewertet: Strom-Mix 3,0, fossile Energie 1,1 und Biomasse 0,2 MWh_{prim}/MWh_{end} . Der Primärenergiefaktor für Strom ist keine konstante Größe, sondern unterliegt Veränderung gemäß den Entwicklungen des deutschen Strom-Mix hin zu einem wachsenden Anteil regenerativer Energien.

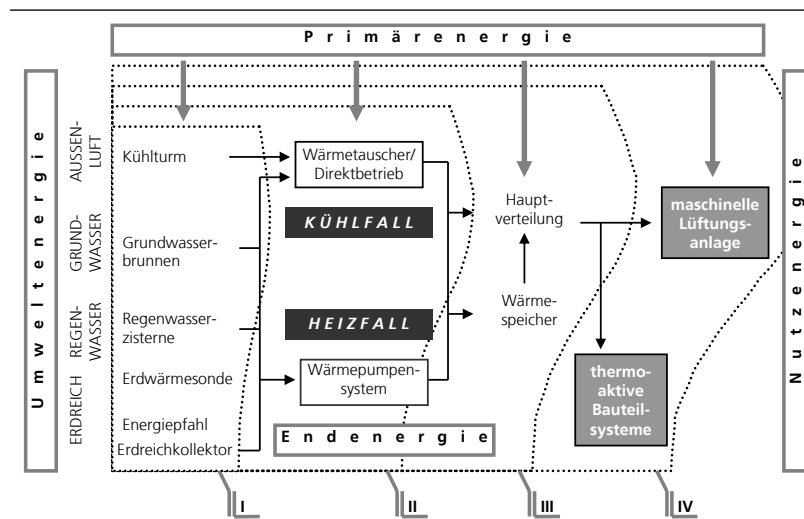


Abbildung 1 Methodik für die Analyse der Gebäudesignatur in Bezug auf Energieeffizienz, Energiebezug und thermischer Raumkomfort. Umweltenergie aus dem Grundwasser, dem Erdreich oder der Außenluft (I) wird für das Heizen in Kombination mit einem Wärmepumpensystem oder für das Kühlen mittels eines Wärmetauschers genutzt (II). Wärme- oder Kälteenergie wird u. U. zur zeitlichen Überbrückung zwischen Angebot und Bedarf zwischengespeichert, dann im Gebäude verteilt (III) und letztendlich durch eine maschinelle Lüftungsanlage und durch thermoaktive Bauteilsysteme im Raum übergeben.

3.1 Umweltenergie zum Heizen und Kühlen

Prinzipiell kann die Energiebereitstellung für die TABS auf alle Arten erfolgen, mit denen Heiz- und Kühlenergie üblicherweise in Gebäuden bereitgestellt wird. Doch der Vorteil von thermoaktiven Bauteilsystemen ist, dass man aufgrund der großen Wärme bzw. Kälte übertragenden Fläche bereits mit sehr kleinen Temperaturdifferenzen zwischen Decken- und Raumtemperatur effektiv heizen oder kühlen kann. Die Kühlwassertemperaturen werden auf einen Temperaturbereich von 16 bis 22°C und die Heizwassertemperaturen auf maximal 27 bis 32°C begrenzt. Demnach kann gut mit Umweltenergie geheizt und gekühlt werden. Im Winter wird das natürlich vorhandene Temperaturniveau der Umweltenergie durch eine Wärmepumpe noch geringfügig und damit

wirtschaftlich günstig erhöht. Im Sommer wird das Erdreich bzw. das Grundwasser direkt als natürliche Wärmesenke zur Kühlung der Gebäude genutzt, sodass lediglich die Energie zur Verteilung der Kühlenergie, nicht aber zu deren Erzeugung, aufgewendet werden muss.

Wärme- bzw. Kältebereitstellung bei geringen Temperaturdifferenzen geht mit einem entsprechend geringeren Exergiebedarf einher. Diese thermodynamische Beschreibung bedeutet auf technischer Ebene einen reduzierten Primärenergieeinsatz. Jedoch bringen die geringen Temperaturdifferenzen aber auch den Nachteil mit sich, da ein verhältnismäßig hoher Volumenstrom gefördert werden muss, um eine entsprechende Wärmemenge zu transportieren. Die jährlich bereitgestellte Heiz- und Kühlenergie der Demonstrationsgebäude liegt zwischen 90 und 265 $\text{MWh}_{\text{therm}}/\text{a}$ (Erdsonden) bzw. 118 bis 416 $\text{MWh}_{\text{therm}}/\text{a}$ (Grundwasser). Bezogen auf die installierte Fläche der thermoaktiven Bauteilsysteme ist dies eine jährliche spezifische Heiz- und Kühlenergie zwischen 20 und 45 $\text{kWh}_{\text{therm}}/(\text{m}^2_{\text{TABSa}})$.

3.2 Effizienz der Bereitstellung von Heiz- und Kühlenergie

Die Energieeffizienz - Jahresarbeitszahl (JAZ) - der Heiz- und Kühlsysteme wird entsprechend der vorgestellten Methodik für die jeweilige Bilanzgrenze I bis IV bestimmt (Abbildung 1 und 2).

Bilanzgrenze I: Umweltwärmequelle und -senke

Die Energieeffizienz der Umweltwärmequellen und -senken wird durch den Hilfsstrombedarf bestimmt und ist damit in erster Linie von der elektrischen Leistungsaufnahme der Primärpumpe (Grundwasserpumpe oder Solepumpe) abhängig. Die installierte elektrische Pumpenleistung variiert zwischen 19 und sogar 230 W_{el} pro Kilowatt Heiz- und Kühlleistung der Wärmequelle bzw. Wärmesenke und bestimmt damit entscheidend die erreichte Energieeffizienz. Der jährliche elektrische Energiebezug der Primärpumpen liegt in einer Größenordnung von 1 und 5 $\text{kWh}_{\text{el}}/(\text{m}^2_{\text{TABSa}})$ bezogen auf die gekühlte / beheizte Fläche. Die bereitgestellte Kühlenergie liegt zwischen 12 und 18 $\text{kWh}_{\text{therm}}/(\text{m}^2_{\text{TABSa}})$ für Erdwärmesondenanlagen und zwischen 6 und 38 $\text{kWh}_{\text{therm}}/(\text{m}^2_{\text{TABSa}})$ für Grundwasseranlagen. Diese Kühlenergie wird mit einer Effizienz von 6 bis 16 $\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ bereitgestellt. Dabei ergeben sich für die Grundwassersysteme etwas geringere Jahresarbeitszahlen als für die Erdreichsysteme aufgrund des höheren Hilfsenergieeinsatz im offenen hydraulischen System. Im Heizfall stellen das Erdreich und das Grundwasser rund 10 bis 28 $\text{kWh}_{\text{therm}}/(\text{m}^2_{\text{TABSa}})$ Heizenergie mit einer Effizienz zwischen 8 und 14 $\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ zur Verfügung.

Bilanzgrenze II: Wärmepumpenanlage

Die Wärmepumpenanlage erhöht das vorliegende Temperaturniveau des Erdreich und des Grundwassers (6 bis 14°C) auf die notwendige Vorlauftemperatur von 27 bis 35°C. Für die Wärmepumpenanlagen (Wärmepumpe einschl. Primärpumpe) werden Jahresarbeitszahlen von 3 bis 4 $\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ (Erdreich) bzw. 2,5 bis 3,0 $\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ (Grundwasser) erreicht.

Bilanzgrenze III und IV: Wärme- und Kälteverteilung und Übergabe im Raum

Die elektrisch installierte Leistung der Verteil- und Umwälzpumpen variiert bei den untersuchten Gebäuden zwischen 19 und 80 $\text{W}_{\text{el}}/\text{kW}_{\text{therm}}$. Für die Kälteverteilung im Gebäude und Kälteübergabe im Raum ist damit eine zusätzliche Hilfsenergie von 0.7 bis 3.0 $\text{kWh}_{\text{el}}/(\text{m}^2_{\text{TABSa}})$ erforderlich. Dies führt zu einer Effizienz des gesamten Kühlsystems von 1.5 bis 8.0 $\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$. Die Wärmeverteilung im Gebäude und die Wärmeübergabe im Raum erfordert einen Hilfsenergieeinsatz für die Hydraulik von 1.5 bis 6.5 $\text{kWh}_{\text{el}}/(\text{m}^2_{\text{TABSa}})$. Die Gesamtbilanzierung des Heizungssystems bezüglich der Energieeffizienz führt damit zu Jahresarbeitszahlen von 1 bis 2,5 $\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$.

Die Energie- und Effizienzanalyse der Messprojekte unterstreicht, wie wichtig die richtige Auslegung des Gesamtsystems, eine korrekte Umsetzung auf der Baustelle und schließlich eine vernünftige

Betriebsführung sind, um das hohe Effizienzpotential von Energieversorgungskonzepten mit Umweltenergie wirklich auszuschöpfen.

3.3 Thermischer Raumkomfort im Sommer und Winter

Kühlenergiekonzepte mit thermoaktiven Bauteilsystemen und Umweltenergie stellen für das mitteleuropäische Klima eine energieeffiziente Lösung dar, können aber aufgrund von Systemträgheiten und systembedingten Temperaturen keine stringenten Raumtemperatursollwerte analog des statischen Komfortmodells gewährleisten.

Unter der Prämisse des energieeffizienten Kühlens mit möglichst geringem Kühlenergieeinsatz werden die vorgestellten Gebäude aus dem EnOB Forschungsprogramm auch nach dem adaptiven Komfortmodell bewertet. Weiterhin kann der Nutzer sowohl aktiv in seine Umgebung eingreifen (Öffnen und Schließen von Fenstern und Sonnenschutz) als auch seine Kleidung den Umgebungstemperaturen entsprechend anpassen.

Detaillierte Komfortauswertungen der Gebäude zeigen, dass durch Kühlung mit thermoaktiven Bauteilsystemen die geforderten Raumtemperaturen nach dem adaptiven Komfortmodell unter Berücksichtigung des Nutzerverhaltens (fast) immer eingehalten werden können. Abbildung 2 (Mitte) stellt die Auswertung des gemessenen sommerlichen Raumkomforts (minimale, maximale und durchschnittliche Raumtemperaturen) gemäß der DIN EN 15251:2007-08 für ein Bürogebäude mit 2.500 m² Nettogrundfläche dar. Betrachtet man die mittlere operative Raumtemperatur, zeigt sich, dass die Komfortkriterien für Komfortklasse A (adaptives Komfortmodell) nur sehr selten und an einzelnen Stunden überschritten werden. Auch während höheren Außentemperaturen bewegt sich die mittlere Raumtemperatur in den geforderten Grenzen – ein mittlerer Wert von 27°C wird nie überschritten.

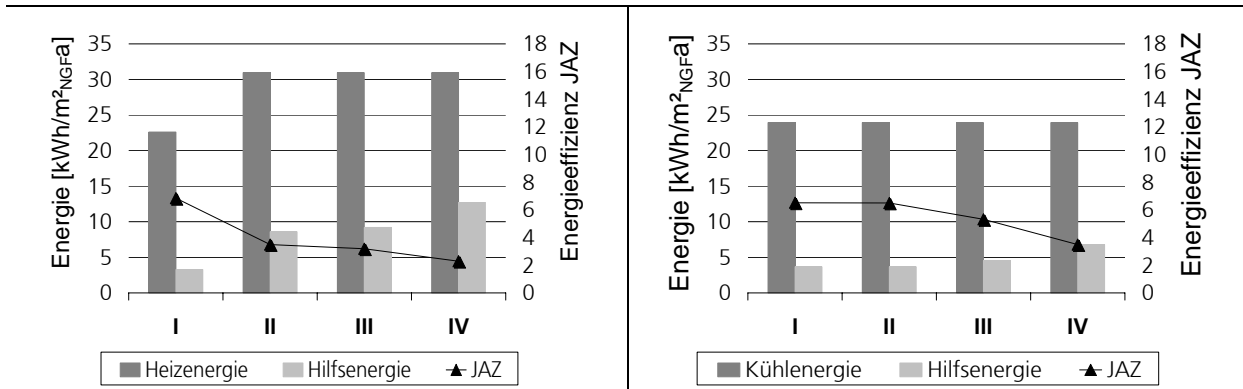
Die Gesamtauswertung macht deutlich (Abbildung 3), dass alle Gebäude nach dem adaptiven Komfortmodell die Klassen A und B sowie in Sommern mit lang anhaltenden Hitzeperioden die Klasse C erreichen. Mittlere operative Raumtemperaturen liegen zwischen 22 und 25°C. In der Komfortanalyse der einzelnen Gebäude zeigt sich kein ausgeprägter Unterschied in Abhängigkeit der jeweils eingesetzten Umweltenergiesenken – eine ausreichende Dimensionierung und eine vernünftige Betriebsführung vorausgesetzt. Das Erdreich und das Grundwasser sind von der Außentemperatur weitgehend unabhängige Wärmesenken, die es ermöglichen Gebäude auch bei höheren Außentemperaturen effektiv zu kühlen. Auch im Winter kann die Betonkerntemperierung in diesen Gebäuden den thermischen Komfort ohne zusätzliche statische Heizflächen gewährleisten. Die nach den DIN EN 15251:2007-08 festgelegten Raumtemperatursollwerte von minimal 19 bis 21°C werden nur selten unterschritten (Ausführliche Diskussion zum thermischen Komfort in [Kalz 2009] und [Pfafferott 2007]).

4 Die Gebäudesignatur – Energiebezug, Energieeffizienz und Thermischer Raumkomfort

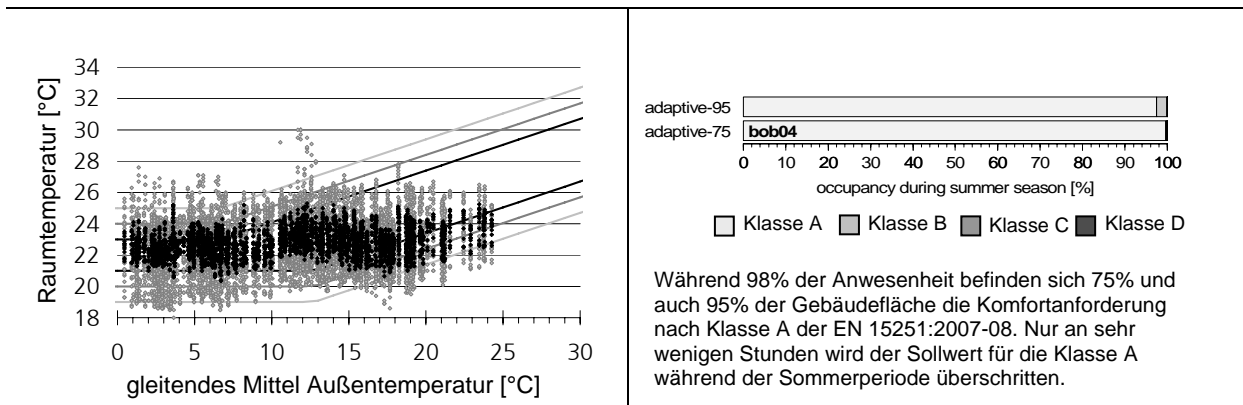
Zukünftig müssen Heiz – und Kühlenergiekonzepte gleichermaßen nach dem Energiebezug, der Energieeffizienz und dem thermischen Raumkomfort bewertet werden, um eine nachhaltige Energieversorgung und hohe Nutzerzufriedenheit zu gewährleisten. Ein Energiekonzept ist erst dann zufrieden stellend, wenn mit möglichst geringem Energieeinsatz und bei hoher Anlageneffizienz ein guter thermischer Raumkomfort zur Verfügung gestellt werden kann.

Eine primärenergetische Analyse erlaubt es, die unterschiedlichen Heiz- und Kühlkonzepte sowie den Einsatz unterschiedlicher Energieträger (Umweltenergie, Abwärme, Fernwärme, Biomasse, fossile Energieträger) miteinander zu vergleichen und zu bewerten. Mit entsprechenden Gebäudesignaturen können diese drei Parameter – Energiebezug, Energieeffizienz und Raumkomfort - in einen

Heiz- und Kühlenergie und Energieeffizienz



Thermischer Raumkomfort im Winter und Sommer nach Europäischer Richtlinie EN 15251:2007-08



Ganzheitliche Bewertung des Heiz- und Kühlkonzeptes (Raumkomfort – Energiebezug – Energieeffizienz)

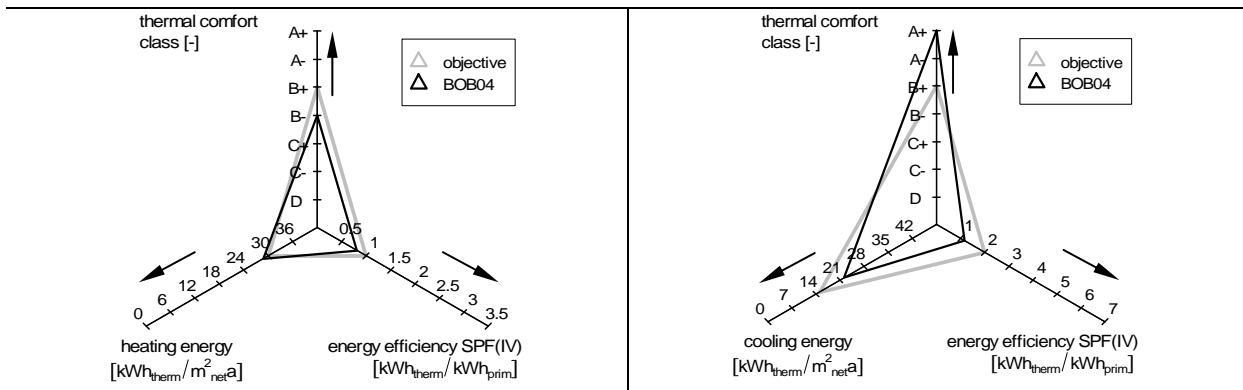
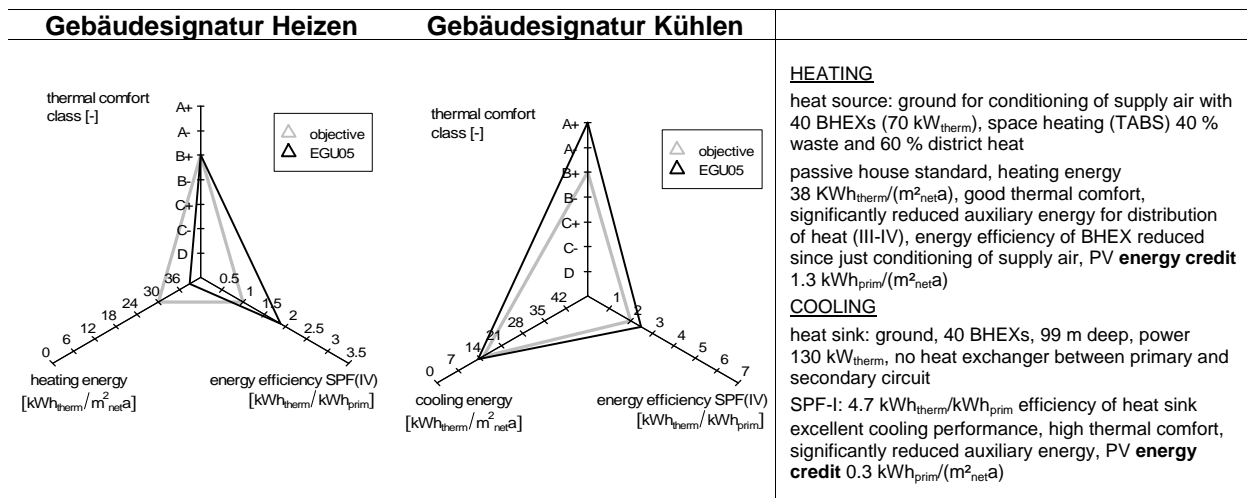


Abbildung 2 Bewertung der drei Qualitätsgrößen (Energiebezug, Energieeffizienz Gesamtsystem und thermischer Raumkomfort) am Beispiel eines kleinen Bürogebäudes (NGF 2.100 m²). **Oben:** Von der Umweltwärmequelle und –senke bereit gestellte Heiz- und Kühlenergie (I) und von der Wärmepumpe abgegebene Heizenergie (II). Die Wärmeverlust und –gewinne in Bilanzgrenze III und IV werden nicht berücksichtigt. Die Jahresarbeitszahl wird für jede Bilanzgrenze bestimmt. Bilanzgrenze IV stellt die Gesamteffizienz des Systems dar. **Mitte:** Bewertung des thermischen Raumkomfort während der Anwesenheit des Nutzers nach dem adaptiven Komfortmodell, 15251:2007-08. Die Linien markieren die Komfortgrenzen für die Klassen A, B und C. Die grauen Symbole stellen maximale und minimale Raumtemperaturen dar. Die schwarzen Kreise kennzeichnen den Mittelwert aller Räume. **Unten:** Gebäude-signatur für Kühl- und Heizenergiekonzept: Das graue Dreieck stellt Zielwerte für den Kühl- bzw. Heizenergiebezug, die Energieeffizienz und den Raumkomfort dar. Die Pfeile kennzeichnen die Richtung des Optimums für den jeweiligen Parameter. Das schwarze Dreieck stellt die Kennzahlen auf Basis der Langzeitmessungen dar. Die Energieeffizienz (engl. seasonal performance factor SPF) ist auf Basis einer primärenergetischen Analyse für das gesamte System dargestellt, d.h. Bilanzgrenze IV angegeben (Abbildung 1).

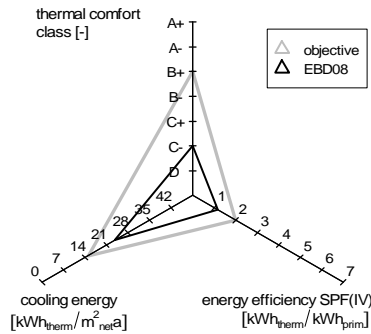
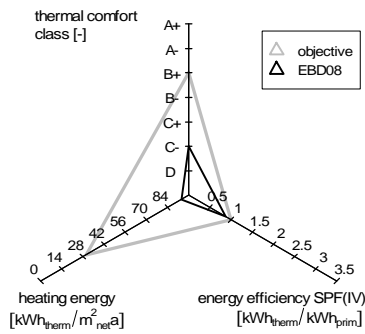
Zusammenhang gebracht und die Zielstellung überprüft werden. Das graue Dreieck in Abbildung 2 stellt die Zielwerte für die jeweiligen drei Parameter dar. Die schwarzen Dreiecke in Abbildung 2 und 3 verdeutlichen die jeweilig gemessenen Energiekennzahlen und den Raumkomfort. Je größer das Dreieck ist, desto besser ist die Gesamtpformance des Heiz- und Kühlkonzeptes. Ein möglichst optimal ausgelegtes und betriebenes Heiz- und Kühlkonzept

- erreicht einen thermischen Raumkomfort der Komfortklasse B (hohe Nutzerzufriedenheit) nach dem adaptiven Modell der DIN EN 15251:2007-08.
- unterschreitet einen spezifischen Wert von $20 \text{ kWh}_{\text{therm}}/\text{m}^2\text{a}$ Kühlenergie bzw. $30 \text{ kWh}_{\text{therm}}/\text{m}^2\text{a}$ Heizenergie pro Quadratmeter Nettogrundfläche.
- stellt Kühlenergie mit einer hohen Energieeffizienz von $\text{JAZ } 6 \text{ kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ bezogen auf Endenergie bzw. einer $\text{JAZ } 3 \text{ kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{prim}}$ bezogen auf Primärenergie zur Verfügung.
- stellt Heizenergie mit einer Energieeffizienz von mindestens $\text{JAZ } 3 \text{ kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ bzw. $\text{JAZ } 3 \text{ kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{prim}}$ zur Verfügung.

Abbildung 3 zeigt, dass mit ausreichend dimensionierten Umweltenergiesenken und -quellen Kühl- und Heizenergie mit hoher Effizienz und gutem thermischen Komfort bereitgestellt werden kann. Dennoch wird deutlich, dass die Effizienz der Systeme weiter verbessert werden muss, so zum Beispiel durch konsequente Optimierung der hydraulischen Anlagen und Anlagenkomponenten sowie durch einen optimierten Wärmepumpenbetrieb [Kalz 2009c]. Aufgrund des deutlich reduzierten Endenergiebezugs für die Bereiche Heizen, Kühlen, Lüften und Beleuchten (unter $60 \text{ kWh}_{\text{end}}/(\text{m}^2_{\text{NGFA}})$) steigt die Bedeutung des Hilfsenergiebezugs für die Hydraulik und das Potential für weitere Energieeinsparungen. Der Hilfsenergiebezug für die Pumpen im Heiz- und im Kühlfall beläuft sich auf 15 bis 30 % ($3 \text{ and } 10 \text{ kWh}_{\text{end}}/(\text{m}^2_{\text{net}}\text{a})$) des gesamten End- und Primärenergiebezugs der Gebäude.



Fortsetzung nächste Seite

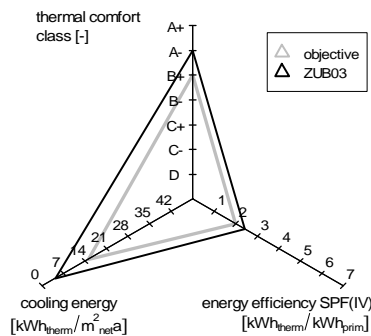
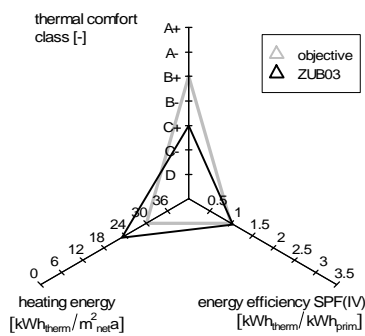


HEATING

heat source: 10 % waste heat from printers and 90 % gas boiler with efficiency of 0.81, refurbished building, auxiliary energy use of 1.3 kWh_{end}/(m²_{TABSa}) (I to IV), use of waste heat insufficient, high heating demand, heating delivery: 69% radiator, 18 % ventilation, 13 % radiant floor system

COOLING

heat sink: ground, 12 BHEXs, 44 m deep, no heat exchanger between primary and secondary circuit, use of cooling panels with phase change materials
primary pump serves as distribution pump, inaccurate hydraulic system, high pressure drops, high auxiliary energy use (I to IV) of 13 kWh_{end}/(m²_{TABSa}), poor efficiency performance, BHEXs insufficiently sized, interior comfort benefits from night ventilation

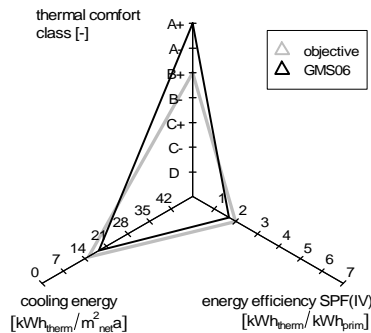
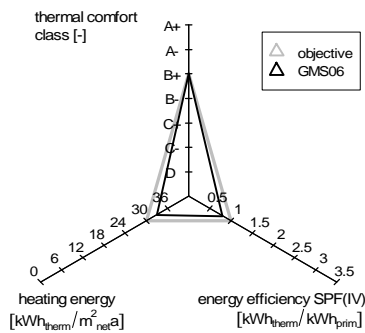


HEATING

heat source: district heat, comfort: class C+, good building performance, reduced heating demand, delivery of heating energy by radiant floor and concrete core conditioning

COOLING

heat sink: base plate heat exchanger 120 m², power 6.5 kW_{therm}, comfort: A-
SPF(I): 10.5 kWh_{therm}/kWh_{prim}
optimized building envelope, high-efficient generation of cooling energy → circulation pump of 300 W in primary circuit, limited cooling potential of heat sink, reduced auxiliary energy in balance boundary III and IV, thermal comfort benefits additionally from nighttime ventilation, good thermal comfort even under persistent 2003 heat wave

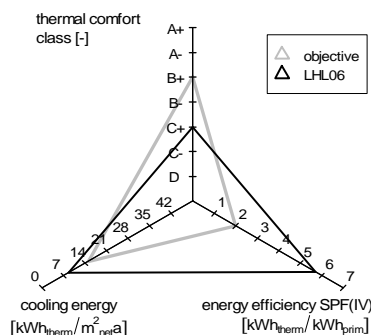
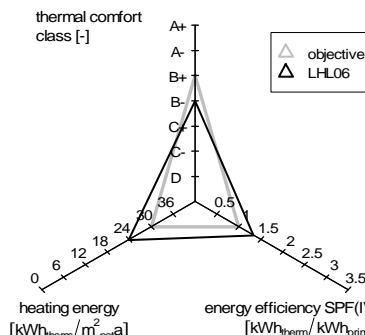


HEATING

heat source: ground water well and heat pump, 240 kW_{therm}, 72 kW_{el}, backup biomass (2 %), water supply temperature of heat pump 27 - 29 °C, thermal water storage 2x1,500 liters
SPF-II: 1.0 kWh_{therm}/kWh_{prim} efficiency of heat pump system, open-loop system in primary circuit requires high auxiliary energy use in primary circuit of 1.8 kWh_{end}/(m²_{TABSa}) → lower efficiency than ground systems

COOLING

heat sink: ground water well, flow rate 70 m³/h, cooling power 250 kW_{therm}, comfort class A+, SPF-I: 3.3 kWh_{therm}/kWh_{prim} efficiency of heat sink
open-loop system in primary circuit requires high auxiliary energy use → smaller efficiency than ground systems, 24-hour conditioning of server rooms by ground water well diminishes efficiency → SPF(I): 4.1 kWh_{therm}/kWh_{prim} without consideration of cooling server rooms

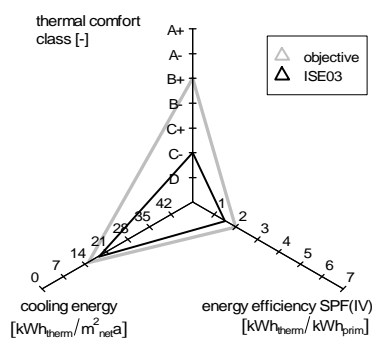


HEATING

heat source: ground water well and heat pump, 55 kW_{therm}, 8 kW_{el}, backup biomass (50%)
comfort class B -
SPF-II: 1.8 kWh_{therm}/kWh_{prim} efficiency of heat pump system, high-efficient performance of ground water well, reduced heating demand, conditioning of supply air by biomass, benefits from energy credit for PV of 2.5 kWh_{prim}/(m²_{net,a})

COOLING

heat sink: ground water well with flow rate 11 m³/h, cooling power 80 kW_{therm}, comfort class C+
SPF-I: 5.8 kWh_{therm}/kWh_{prim} efficiency of heat sink
high-efficient system, reduced auxiliary energy use for distribution and circulation pumps, achieved occupant thermal comfort below requirements, benefits of **energy credit** for PV of 0.2 kWh_{prim}/(m²_{net,a})



COOLING

heat sink: ambient air, mechanical nighttime ventilation
 SPF-I: 1.5 kWh_{therm}/kWh_{prim} efficiency of nighttime ventilation concept
 excellent comfort during moderate summer, reduced cooling potential during 2003 heat wave, air-coupled systems not as effective as water-based TABS system, poor efficiency in boundary I compared to geothermal systems, but no additional auxiliary energy required for distribution of cooling energy, entire system efficiency satisfactory

Abbildung 3 Gebäudesignaturen für den Heizfall (links) und den Kühlfall (Mitte) sowie Kurzbeschreibung des Konzeptes und der Heiz- und Kühlperformance: Korrelation von thermischen Komfort nach adaptiven Komfortmodell EN 15251:2007-08, spezifischer Heiz- und Kühlenergiebezug und Energieeffizienz (JAZ, dt. und SPF, engl.) des gesamten Systems.

Diese Arbeit wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert (Förderkennzeichen 0335007P, Projektträger Forschungszentrum Jülich). Die Autoren danken den einzelnen Evaluierungsteams für die Messdatenaufbereitung und -auswertung sowie für hilfreiche Diskussionen: I. Repke (FH Köln), P. Obert, G. Mengedoht and G. Lindemann (FH Ulm), M. Ehlers and F. Ghazai (TU München), C. Sasse (TU BS), D. Schmidt and J. Kaiser (Fraunhofer IBP), M. Kappert and C. Pechtl (FH Erfurt), R. Koenigsdorff and S. Heinrich (Hochschule Biberach), T. Häusler (TU Cottbus), E. Bollin (FH Offenburg), M. Melcher (Engelhardt & Bauer Druck Karlsruhe), T. Knapp und B. Bagherian (TU Karlsruhe).

[EnoB 2009] **Forschung für Energieoptimiertes Bauen**, Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, www.enob.info, Oktober 2009.

[EnSan 2009] **Forschung für Energieoptimiertes Bauen in der Sanierung**, Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, www.enob.info/de/sanierung, Oktober 2009.

[EN 15251] EN 15251:2008-07. Eingangsparemeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. Beuth Verlag, Berlin, 2005.

[Kalz 2009a] **Signatures correlating thermal comfort and low-energy cooling: in-use performance.**: Kalz, D. E., Pfafferott, J., Herkel, S. and Wagner, A. Building (2009) Building Research and Information, 37(4): 413-432.

[Kalz 2009b] **The impact of auxiliary energy on the energy efficiency of the heating and cooling system.**: Kalz, D. E., Herkel, S. and Wagner, A. (2009) Energy and Buildings, doi:10.1016/j.enbuild.2009.05.004.

[Kalz 2009c] **A holistic approach to the evaluation of heating and cooling concepts**: Kalz, D. E., Pfafferott, J. and Herkel, S. (2009) Building and Environment, doi:10.1016/j.buildenv.2009.07.016.

[Pfafferott 2007] **Comparison of low-energy office buildings in summer using different thermal comfort criteria**: Pfafferott, J., Herkel, S., Kalz, D. und Zeuschner A. (2007) Energy and Buildings, 39(7):750-757.