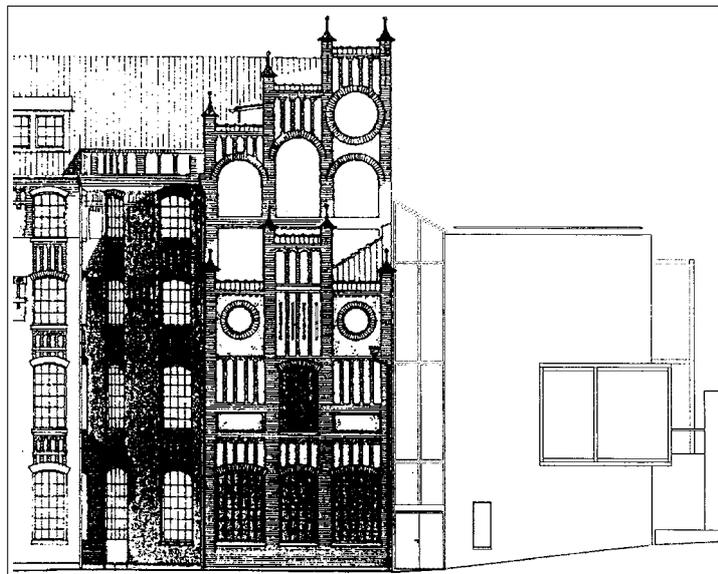


Thermische Simulationsrechnungen zu dem Neubau des Zentrums für umweltgerechtes Bauen

-ZUB-



Nr.: IBH 287/99

Bauherr:

Zentrum für umweltgerechtes Bauen

Gottschalkstraße 28

34109 Kassel

Thermische Simulationsrechnungen zu dem Neubau des Zentrums für umweltgerechtes Bauen

1. Objektbeschreibung
2. Allgemeine Aufgabenstellung
3. Grundlagen
4. Untersuchungsmethodik und Berechnungsgrundlagen
5. Gebäude- und Raumgeometrien
6. Bauteile
7. Nutzung
8. Meteorologie
10. Untersuchungsergebnisse
 - 10.1 Voruntersuchungen
 - 10.1.1 Art der Verglasung
 - 10.1.2 Varianten des Geschoßdeckenaufbaus
 - 10.2 Gesamtgebäudesimulation Auslegungsfall
 - 10.3 Gesamtgebäudesimulation mit idealem Heiz- bzw. Kühlsystem
 - 10.4 Deckenheiz- und Kühlsystem Auslegungsfall
 - 10.5 Deckenheiz- und Kühlsystem Jahressimulation
 - 10.6 Bodenplattenkühler
11. Literatur

Tabellen und Bilder

Auftraggeber: Zentrum für umweltgerechtes Bauen
Gottschalkstraße 28
34109 Kassel

Baunatal, den 22. Januar 2001

(Dipl.-Ing. Christoph Kempkes)

1. Objektbeschreibung

Das Gebäude, in dem das Zentrum für umweltgerechtes Bauen untergebracht werden soll, schließt sich direkt an das bestehende Kolbenseeger Gebäude der Universität Kassel an. Es beinhaltet einen Hörsaal im Erdgeschoß, Büro- und Arbeitsräume im ersten und zweiten Obergeschoß und in jeder Ebene jeweils einen Laborbereich zur Aufnahme von Versuchseinrichtungen.

Die prinzipiellen energetischen Ziele sind ein Heizwärmebedarf von weniger als 25 kWh/(m²a), eine weitgehend natürliche Belichtung der Räume, ein gutes sommerliches Wärmeverhalten und die Nutzung passiver Solarenergie. Der verbleibende Wärmebedarf des Neubaus soll - kostengünstig und umweltgerecht - über den Fernwärmeanschluß des Altbaus gedeckt werden. Innovative Fassaden- und Energieerzeugungstechniken sollen zu Versuchs- und Demonstrationszwecken ergänzend eingebaut und untersucht werden. Aufgrund dieser Zielsetzung wird der Baukörper modular konstruiert, damit z.B. Fassadenbauteile oder haustechnische Anlagenteile im Verlauf der Nutzung ausgewechselt werden können.

Das Gebäude wird in Stahlbeton-Skelettbauweise ausgeführt. Das konstruktive Stützenraster beruht auf einem wirtschaftlichen Primärsystem von 5,40 m und einem Ausbaumodul von 1,35 m. Die Primärkonstruktion besteht aus runden Stahlbetonstützen mit Flachdecken.

Für die Außenfassade des ZUB ist ein Fassadensystem mit einem hohen Fensterflächenanteil sowie effiziente, außen angebrachte Sonnenschutzvorrichtungen geplant. Bei Bedarf können die Sonnenschutzvorrichtung durch Verändern des Anstellwinkels der Lamellen zur Versorgung der Räume mit Tageslicht herangezogen werden. Für die opaken Flächen der Fassade sind gut wärmegeämmte Konstruktionen mit einem k-Wert $\leq 0,2$ W/(m²K) vorgesehen.

Eine mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung reduziert die Lüftungswärmeverluste. Die Zuluft strömt über den Ansaugkanal und die Wärmerückgewinnungsanlage in den Kellerflur und wird von dort den Büro- und Laborräumen zugeführt. Alternativ dazu kann, bei Umkehr der Strömungsrichtung, die Zuluft auch in die Büros eingebracht werden. Der Grundluftwechsel im Vortragsraum wird über eine separates Zu- und Abluftsystem sichergestellt. Ein erhöhter Frischluftbedarf bei hoher Personenbelgung kann über eine ebenfalls mögliche Fensterlüftung mit ausreichend dimensionierten Öffnungsflügeln realisiert werden.

Die Räume sollen mit einem Bauteilheiz- und kühlssystem thermisch konditioniert werden, wobei je ein System im Fußboden (klassischer Fußbodenheizungsaufbau) und ein System in der Decke (Bauteilaktivierung) realisiert werden soll. Der Betrieb kann wahlweise als Einzelsystem oder auch kombiniert erfolgen.

2. Allgemeine Aufgabenstellung

Für repräsentative Gebäudeteile unter Einbeziehung des Bauteilheiz- und Kühlsystems sowie für das Gesamtgebäude soll mittels thermischer Simulationsrechnungen eine Bewertung des zu erwartenden Heizwärme- und Kunstlichtbedarfes einerseits, sowie des sommerlichen Temperaturverhaltens und Kühlkältebedarfes andererseits vorgenommen werden. Durch Variation einzelner Einflußgrößen - Aufbau der Bauteile (Art der Verglasung), Betrieb der Sonnenschutzvorrichtungen, Nutzungsmodalitäten und insbesondere die Regelung von Lüftung, Heizung und Kühlung - kann der jeweilige Einfluß quantifiziert und so die Wirkung und die technische Machbarkeit der Kombinationen von baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen beurteilt werden.

3. Grundlagen

Grundlagen der Untersuchungen bilden nachfolgend aufgeführte Pläne und Beschreibungen:

- Lageplan des Gebäudes
- allgemeine Baubeschreibung inklusive Wärmeschutz- und Schallschutznachweis mit Planstand Genehmigungsplanung
- Gebäudegrundrisse einschl. Gebäudeansichten mit Planstand Genehmigungsplanung
- Festlegungen zur vorgesehenen Raumnutzung
- Beschreibung der vorgesehenen technischen Gebäudeausrüstung

4. Untersuchungsmethodik und Berechnungsgrundlagen

Die Untersuchung wird rechnerisch mittels dynamischer Simulation mit dem Programm HAUSer [1, 2] durchgeführt, wobei bei der Berechnung der Bauteiltemperierung die mehrdimensionalen Wärmeübertragungsvorgänge in den Decken in Anlehnung an [3] über dreidimensionale Temperaturfeldbetrachtungen erfolgt und bereichsweise mittlere Oberflächentemperaturen der Decken dem Programm HAUSer übergeben werden. Die Simulationstechnik ermöglicht die Betrachtung einzelner Phänomene unter gleichen Randbedingungen und somit den exakten Vergleich des Einflusses verschiedener Parameter.

Um das Nutzerverhalten möglichst exakt zu erfassen, wird die operative Raumtemperatur und nicht ausschließlich die Raumlufttemperatur als Bewertungsgröße herangezogen. Diese ist für die Beurteilung der Behaglichkeit maßgebend. Sie errechnet sich aus dem arithmetischen Mittel der flächengewichteten Oberflächentemperatur aller raumbegrenzenden Bauteile und der Raumlufttemperatur. Im Falle der Beheizung über die Raumheizflächen stellen sich die Raumlufttemperatur und die operative Temperatur des jeweiligen Raumes entsprechend der Wärmeabgabe der temperierten Flächen bei dem jeweiligen Betriebszu-

stand ein.

Alle für die Berechnungen notwendigen Grundlagen bezüglich der Gebäudegeometrie, der betrachteten Baukonstruktionen, der Gebäudenutzung und der Meteorologie sind im folgenden dargestellt.

5. Gebäude- und Raumgeometrien

Die Heiz- und Kühllastuntersuchungen sowie die Ermittlung typischer Jahrestemperaturverläufe werden für das Gesamtgebäude bei Annahme stationärer und instationärer Randbedingungen durchgeführt. Für einzelne, repräsentative Raumgeometrien werden detaillierte Berechnungen unter Einbeziehung des Decken- und Fußbodenheizsystems bei stationären Randbedingungen (Überprüfung der eingebrachten Heizleistung) und bei Annahme verschiedener Regelstrategien des Systems durchgeführt.

Die Bilder 1 bis 4 zeigen das Kellergeschoß, das Erdgeschoß sowie das 1. und 2. OG der zugrunde gelegten Gesamtgebäudegeometrie, in den Bildern 5-7 sind die jeweils bei den Einzelraumbetrachtungen verwendeten Raumgeometrien dargestellt.

Die Bauteile der wärmetauschende Gebäudehüllfläche und der Innenbauteile werden bei der Flächenermittlung -je nach Einbausituation- mit Außen- bzw. Achsmaßen in Ansatz gebracht.

6. Bauteile

Die betrachteten Bauteile entsprechen baupraktischen Ausführungen in enger Anlehnung an den Wärme- und Schallschutznachweis des Bauantrages, zur Vereinfachung wird dabei auf die Darstellung bzw. Diskretisierung von wärmetechnisch nicht oder nur geringfügig relevanten Ebenen (Abdichtungsebenen, Folien) verzichtet.

Eine Beschreibung der zugrunde gelegten Bauteile findet sich in Tabelle 1, die für die thermische Gebäudesimulation notwendigen Materialeigenschaften sind [4, 5] entnommen.

Hinsichtlich des Sonnenschutzes wird von eher ungünstigen Verhältnissen ausgegangen. Der in Ansatz gebrachte Abminderungsfaktor beträgt 0,40. Bei Einsatz von außenliegenden Sonnenschutzvorrichtungen können in der Ausführung sicherlich bessere Werte erreicht werden.

Die Absortionsgrade von Wänden und Dächern werden mit 0,6 angesetzt .

7. Nutzung

Die für die einzelnen Gebäudezonen (Räume) in Ansatz gebrachten Tageszyklen sind zusammengefaßt in der Tabelle 2 aufgeführt, wobei zwischen der eigentlichen Nutzungszeit von 8-17 Uhr und den Nacht- bzw. Wochenendzeiten, zu denen keine Nutzung stattfindet,

unterschieden wird. Die zugrunde gelegten Nutzungsprofile wurden vor Beginn der Simulationsrechnungen in Abstimmung mit dem Bauherrn/Nutzer festgelegt.

Der Luftwechsel der einzelnen Gebäudezonen wird bis zu einer Raumtemperatur von 24 °C mit den dargestellten Werten angesetzt. Um bei höheren Raumtemperaturen ein Fensteröffnen zu simulieren, wird der Luftwechsel bei höheren Raumtemperaturen als 24 °C temperaturabhängig gesteuert. Bei Temperaturen über 24 °C erhöht sich -sofern nicht anders angegeben - der Luftwechsel während der Nutzungszeit auf 5 pro Stunde, falls die Außenlufttemperatur tiefer als die Raumtemperatur ist. Hierdurch wird ein -im Sinne der Vermeidung zu starker Überheizungseffekte- bewußtes Nutzerverhalten unterstellt. Neben einer intensiven Lüftung am Tage trägt insbesondere eine intensive Nachtlüftung zur Senkung des Temperaturniveaus bei, die Aufheizung der Räume fällt hierdurch wesentlich geringer aus, was jedoch -falls nicht anders angegeben- in der Regel nicht berücksichtigt wird.

In den unbeheizten Räumen (Sollwert der Temperatur 10 °C, d.h. die Temperatur stellt sich frei ein) wird ein konstanter Infiltrationsluftwechsel mit $n=0,1 \text{ h}^{-1}$ resp. $n=0,3 \text{ h}^{-1}$ berücksichtigt, vgl. Tabelle 2. In den beheizten Zonen wird in der Regel zusätzlich zu dem durch die Lüftungsanlage aufgeprägten mechanischen Luftwechsel ein Infiltrationsluftwechsel von ebenfalls $0,1 \text{ h}^{-1}$ angesetzt.

8. Meteorologie

Die Simulationsrechnungen werden mit den stündlichen Wetterdaten für die Klimazone 4 [6-8] durchgeführt. Gemäß [7] sind diese Daten für den Realstandort Kassel zu verwenden.

9. Lüftungsanlage

Für die Lüftungsanlage des Gebäudes wurde gemäß den Angaben des IB Springl von einem Gesamtvolumenstrom von $3300 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgegangen. Der Gesamtvolumenstrom teilt sich dabei gemäß der in Tabelle 3 aufgeführten "Volumenstrommatrix" auf die einzelnen Raumzonen auf, wobei abweichend vom späteren Planungskonzept hier noch nicht von der separaten Be- und Entlüftung des Lehrsaals ausgegangen wird. In der Matrix bedeuten negative Werte ein Abströmen aus dem Raum der entsprechenden Zeile, positive Werte demgemäß ein Zuströmen aus dem Raum der zugehörigen Spalte in den Raum der jeweiligen Zeile. Eine Richtungsumkehr der Lüftungsanlage läßt sich durch entsprechende Vorzeichenumkehr realisieren. Zu- bzw. Abluftmengen im Raum sind in den beiden zusätzlichen Spalten rechts aufgeführt. Bezüglich des Wärmetauschers wird von einem Temperaturwirkungsgrad von 80% ausgegangen.

10. Untersuchungsergebnisse

10.1 Voruntersuchungen

In den projektbegleitenden Planungsbesprechungen wurden Fragestellungen hinsichtlich des Einflusses der Verglasungsart und der Auswirkung verschiedener Bodenaufbauten aufgeworfen, welche im Vorfeld der eigentlichen Gebäudesimulation anhand von Einzel-

raumbetrachtungen bewertet werden.

10.1.1 Art der Verglasung

Im Bild 8 ist für das Büro und den Besprechungsraum, im Bild 9 für den Laborbereich der Heizwärmebedarf anhand von Monatswerten und Jahressummen dargestellt. Bei Verwendung von Dreischeibenverglasungen ist demnach der Jahres-Heizwärmebedarf durchgängig um ca. 4-5 kWh/(m²a) geringer als bei der (bereits guten) Zweischeibenverglasung, wobei prozentual gesehen die Einsparung bei Gebäudezonen mit ohnehin geringem Heizwärmebedarf (das sind die zentral gelegenen Gebäudebereiche, insbesondere die zentralen Büros) am größten sind. Der spezifische Jahres-Heizwärmebedarf ist z.B. im Laborbereich wegen des höheren Anteils an Außenbauteilen und der geringer angesetzten internen Wärmegewinne um ein mehrfaches höher als in einem zentral gelegenen Büro.

Der energetische Vorteil der Dreischeibenverglasung reduziert sich weiter, wenn man auch den Bedarf an Kunstlicht mit in die Betrachtung einfließen läßt. Im Bild 10 sind für den zentral gelegenen Büroraum der Kunstlicht- und Heizwärmebedarf dargestellt, der sich ergibt, wenn man zusätzlich zu der vorherigen Betrachtung fordert, daß in dem Raum während der Nutzungszeit eine Beleuchtungsstärke von 300 lx zur Verfügung steht und für den Fall, daß die natürliche Beleuchtung hierfür nicht ausreicht, Kunstlicht mit einer Leistungsdichte von 12 W/m² zugeschaltet wird. Der Heizwärmebedarf reduziert sich im Zentralraum bei idealer Regelung insbesondere bei der Dreischeibenverglasung nahezu auf Null, vgl. Bild 10 unten, der Kunstlichtbedarf steigt bei der Dreischeibenverglasung gegenüber der Zweischeibenverglasung wegen des geringeren Transmissionsgrades an. In der Summe aus Kunstlicht- und Heizwärmebedarf ergeben sich für die Dreischeibenverglasung nunmehr nur noch geringe Vorteile. Die Wirtschaftlichkeit einer Verwendung von Dreischeibenverglasung sollte daher bei Bürobauten mit vergleichsweise hohen internen Lasten am konkreten Objekt überprüft werden. Hierbei müssen auch objektspezifisch (insbesondere in bezug auf das Lüftungskonzept und die Anordnung der Heizflächen) Aspekte der Behaglichkeit und des sommerlichen Wärmeschutzes in die Überlegungen einfließen.

10.1.2 Varianten des Geschoßdeckenaufbaus

Es werden die im Bild 11 dargestellten Stahlbetonkonstruktionen sowie zusätzlich - gemäß einer Projektbesprechung am 15.3.1999 - zwei Varianten mit einem Aufbau aus Brettschichtstapeln vergleichend betrachtet. Die Varianten in Holz- bzw. Holz/Stahlbetonverbundbauweise entsprechen den Varianten I bzw. VI der Darstellungen des Ingenieurbüros Bollinger&Grohmann, in diesem Bericht werden die Konstruktionen mit Variante V (reine Brettschichtstapelkonstruktion) bzw. VI (Holz/Stahlbetonverbund) bezeichnet. Für die Deckenaufbauten wurde jeweils anhand eines Standardbürraums das Aufheiz- und Abkühlverhalten - ausgehend von stationären Verhältnissen- bei einem Sprung der Vorlauf-temperatur (15 auf 50°C bzw. 26 auf 12°C) untersucht und die sich bei Jahrressimulationen (Wetterdaten von Würzburg) ergebenden Übertemperaturgradstunden GH₂₆ ermittelt.

Die Bilder 12 und 13 zeigen für die betrachteten Deckenaufbauten den Verlauf der emp-

fundenen Temperatur, wie er sich bei dem erwähnten Sprung der Vorlauftemperatur zur Zeit $t=0$ beim Aufheizen bzw. Abkühlen ergibt. Dargestellt ist jeweils der Verlauf über 24 h. In den Bildern 14 und 15 sind die zugehörigen Verläufe der Oberflächentemperatur dargestellt.

Die dargestellten Ergebnisse verdeutlichen die vergleichsweise hohe Trägheit der Systeme I und II, bei denen die Heiz- und Kühlregister in der tragenden Stahlbetonkonstruktion eingebettet sind. Das erforderliche Aufheizen der großen Bauteilmasse lässt die empfundene Temperatur nur langsam ansteigen, der Sollwert der empfundenen Temperatur (20 °C) wird erst nach etwa 9-10 Stunden erreicht. Die dann auf relativ hohe Temperaturen aufgeheizte Decke lässt auch nach Erreichen des Sollwertes bei abgeschaltetem Massenstrom der Anlage die empfundene Temperatur noch ansteigen, nach dem Erreichen des Maximums fällt die Temperatur nur langsam ab. Dieses Verhalten bedeutet eine extrem schlechte Regelbarkeit des Systems, ein durchgehender Heizbetrieb wäre hier wahrscheinlich die beste Alternative. Eine Kühlung mit direkter Ausnutzung der kühleren Nachttemperaturen ("Stille Kühlung") während der Sommerperiode ist bei diesen Varianten allerdings eher möglich als bei den "flinken" Varianten III-VI, bei denen sich die Register oberhalb bzw. in der Dämmebene zwischen Tragkonstruktion und Estrich befinden. Sind letztgenannte Systeme für den Heizbetrieb deutlich besser geeignet als die Varianten I und II, ist hier die stille Kühlung nur mit entsprechend dimensionierten Pufferspeichern sinnvoll - der Einsatz eines Bodenplattenkühlers ist bei entsprechenden Randbedingungen dann wohl vorzuziehen.

Bezüglich der Übertemperaturgradstunden, vgl. Bild 16, stellt die Variante I die beste Alternative dar, ausgewertet für die Nutzungszeit bewegen sich diese mit Werten zwischen etwa 250 und 1000 Kh/a jedoch generell auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Durch den voraussichtlich vorgesehenen guten Sonnenschutz (Simulation: $z=0,5$) sind hier noch weitere Verbesserungen zu erzielen.

10.2 Gesamtgebäudesimulation Auslegungsfall

Für das Gesamtgebäudemodell wird eine Überprüfung der erforderlichen Heizlast bei stationären Randbedingungen (Auslegungsfall in Anlehnung an [9,10]), ohne Wärmegewinne und abgeschalteter Lüftungsanlage durchgeführt. Bild 17 zeigt die raumweise erforderlichen Heizlasten bei Werten des (in diesem Falle natürlichen) Luftwechsels von $n=0,5\text{ h}^{-1}$, $n=0,3\text{ h}^{-1}$ und $n=0,1\text{ h}^{-1}$. Ein Luftwechsel von $n=0,5\text{ h}^{-1}$ entspricht dabei dem üblichen Auslegungsluftwechsel, ein Wert von $n=0,1\text{ h}^{-1}$ dürfte bei der vorgesehenen dichten Ausführung der Außenbauteile der Realität wohl eher entsprechen. Der Vergleich zeigt die starke Abhängigkeit der erforderlichen Heizlasten von dem zugrunde gelegten Luftwechsel, die projektierte Maximalheizlast von 50 W/m^2 wird jedoch auch für den Auslegungsluftwechsel nicht überschritten.

10.3 Gesamtgebäudesimulation mit idealem Heiz- bzw. Kühlsystem

Ebenfalls für das Gesamtgebäudemodell werden zur Ermittlung des zu erwartenden Jah-

res-Heizwärme und Kühlkältebedarfes Simulationsberechnungen bei den beschriebenen instationären Randbedingungen für ein ideales Heiz- und Kühlsystem durchgeführt. Die Ergebnisse sind repräsentativ für das Gebäude und ermöglichen bei sonst vergleichbaren Randbedingungen durch Abgleich mit real auftretenden Verbräuchen Aussagen hinsichtlich der energetischen Qualität des realisierten Anlagenkonzeptes.

Bild 18 zeigt als Monatswerte dargestellt den Jahresverlauf von Heizwärme- und Kühlkältebedarf für die dargestellten Randbedingungen. Die Heizperiode ist demnach im wesentlichen auf die Kernmonate der Heizperiode beschränkt. Bei Bezug ausschließlich auf die beheizte Fläche ergibt sich ein spezifischer Jahres-Heizwärmebedarf von ca. 10 kWh/(m²a), der Wert liegt somit noch deutlich unter dem Sollwert von 25 kWh/(m²a).

Für den Fall, daß eine Kühlung auf maximal 26 °C Raumtemperatur vorgegeben wird, kann für die Kühlung des Gebäudes ein deutlich höherer Bedarf entstehen als für die Beheizung. Bei der angesetzten Nutzung liegt der Kühlkältebedarf des Gesamtgebäudes mit etwa 14000 kWh um mehr als 30% höher als der Heizwärmebedarf und das trotz des in Ansatz gebrachten erhöhten Luftwechsels.

Die zonenweise Auftragung der Werte für den Heizwärme- und Kühlkältebedarf, Bild 19, zeigt einerseits, daß ein beträchtlicher Teil des Heizwärmebedarfes aus der Beheizung der Laborzonen (Zone 1, 8, 17 und 24) resultiert, andererseits die obereren Laborbereiche (Zone 17 und 24) und insbesondere der Flur im 3. OG vergleichsweise hohen Anteil am Kühlkältebedarf aufweisen. Es sind somit Gebäudezonen mit eher geringen Anforderungen an die Behaglichkeit in nicht unerheblichem Maße am Gesamtbedarf des Gebäudes beteiligt. Durch Verzicht auf die absolute Einhaltung der in der Simulation angesetzten Komfortanforderungen in diesen Gebäudezonen kann der Energiebedarf des Gebäudes noch einmal gesenkt werden.

Bild 20 zeigt den Einfluß eines auch nachts möglichen erhöhten Luftwechsels auf die sommerlichen Raumtemperaturen auf. Bewertungsmaßstab sind hierbei die im Jahresverlauf sich ergebenden Übertemperaturgradstunden Gh₂₆. Diese liegen für den Fall, daß eine Erhöhung des Luftwechsels nur während der Nutzungszeit des Gebäudes erfolgen kann, außer im Kellergeschoß generell bei Werten über 1000 Kh/a, im 1.OG bei Werten über 4000 Kh/a und im 2. OG sogar bei Werten bis hin zu 9000 Kh/a. Bei erhöhter Nachtlüftung ergeben sich hingegen durchweg Werte von etwa 500-1000 Kh/a und liegen somit in dem in [11] empfohlenen Bereich, in dem eine maschinelle Kühlung nicht notwendig erforderlich ist, wenn eine 26 °C Maximaltemperatur nicht zwingend ist. Die Ergebnisse zeigen in welchem Maße sich durch das Nutzerverhalten die Raumtemperaturen im Sommer beeinflussen lassen, was ideale Bedingungen für z.B. die meßtechnische Untersuchung von Kühlvorrichtungen schafft, da leicht "künstliche" Kühllasten erzeugt werden können. Nichtsdestotrotz bleibt festzuhalten, daß eine Kühlung nicht notwendigerweise erforderlich ist, insbesondere bei weiterer Verbesserung des Sonnenschutzes (Simulation z=0,4) auf Werte um z=0,2.

Im Bild 21 sind die zu den betrachteten Varianten korrespondierenden Maximaltemperatu-

ren aufgetragen.

Bild 22 zeigt Jahresverläufe der operativen Temperatur für die Zonen 7 (Kellerflur) und 19 (Zentralbüro). Neben der Darstellung eines typischen Temperaturverlaufes in einem für Meßzwecke herzurichtenden Raum wird deutlich, daß die operativen Temperaturen im Kellerflur trotz der Einbringung des gesamten Volumenstromes in diesen Bereich (im Mittel) nicht unter 15 °C absinken. Allerdings verbleibt die Frage nach der empfundenen Temperatur in direkter Nähe des Zuluftgitters (Strömungsgeschwindigkeit, Turbulenz).

10.4 Deckenheiz- und Kühlsystem Auslegungsfall

Analog zu der Ermittlung der raumweisen Heizlast (Auslegungsbedingungen) werden für die Einzelzonen Zentralbüro, Besprechungsraum und Labor Berechnungen bei stationären Randbedingungen durchgeführt, um bei verschiedenen Systemparametern des Heizsystems die im Auslegungsfall in die Zone eingebrachten Leistungen bzw. die sich einstellenden Raumtemperaturen zu ermitteln. Betrachtet wurden die Systeme Deckenheizung und Fußbodenheizung, wobei im folgenden nur die Ergebnisse für das Deckensystem dargestellt sind, da dieses einerseits für die Beheizung den ungünstigeren Fall darstellt und andererseits für das System Fußbodenheizung allgemein anwendbare Auslegungskriterien existieren. Bei den Berechnungen wird von einem mittleren Infiltrationsluftwechsel von $0,3 \text{ h}^{-1}$ ausgegangen. Variiert werden der Massenstrom des Heizmittels (5,5 und $10 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h})$), der Verlegeabstand der Heizrohre VZ (12, 15 und 20cm, Darstellung nur für 15 und 20 cm) und die Vorlauftemperatur (25 und 30 °C).

Der Vergleich der Varianten untereinander, Tabellen 4 und 5, zeigt, daß bezüglich der eingebrachten Heizleistung die Vorlauftemperatur die dominante Rolle spielt. Eine Erhöhung der Vorlauftemperatur von 25 °C auf 30 °C bewirkt demnach eine Erhöhung der Raumtemperatur von etwa 4K, wohingegen der Einfluß des Massenstromes bei etwa 1K Temperaturänderung liegt und der Einfluß des Verlegeabstandes sogar nur etwa 0,3-0,5 K beträgt. Für die Beheizung des Zentralbüros im Auslegungsfall ist, vgl. Tabelle 4 nach den Ergebnissen eine Vorlauftemperatur von knapp über 25 °C ausreichend, wohingegen diese Vorlauftemperatur im Besprechungsraum nur - je nach Variante - zu Raumtemperaturen von 15-17 °C führt. Die Heizleistung ist für ungünstig gelegene Gebäudezonen mit hohem Anteil an Außenbauteil bei Vorlauftemperaturen von 25 °C unter Auslegungsbedingungen nicht ausreichend, erforderlich sind, wiederum je nach Variante, Werte der Vorlauftemperatur von knapp über 30 °C. Da andererseits die erforderlichen Systemtemperaturen so gering wie möglich zu halten sind, führt dies zu der Empfehlung, in den Randzonen des Gebäudes mit möglichst geringen Verlegeabständen und einer - unter Beachtung der auftretenden Druckverluste - Erhöhung des Heizmittelstromes zu operieren. Die Verringerung des Verlegeabstandes Vz hat zusätzlich einen positiven Einfluß auf das dynamische Verhalten des Heizsystems, indem Aufheiz- und natürlich auch Abkühlvorgänge (in Maßen) schneller vonstatten gehen. Dieser Effekt ist in Bild 23 für die Systeme Deckenheizung und Fußbodenheizung für einen Aufheizvorgang bei Verlegeabständen von $V_z=15\text{cm}$ und $V_z=20 \text{ cm}$ dargestellt.

Bei der Interpretation der Tabellenwerte ist zu beachten, daß für die Berechnungen der Tabelle zwar mit einem gegenüber den Vorgaben gemäß [9,10] verringerten Ansatz für den Luftwechsel operiert wird, daß andererseits bei guter Planung und Ausführung auch in der Realität durchaus noch geringere Luftwechsel zu erwarten sind. Andererseits hat der angesetzte Luftwechsel einen entscheidenden Einfluß nicht nur auf den Heizwärmebedarf, sondern auch auf die Auslegungslast, wie durch Vergleichsrechnung analog zu Tabelle 4 und 5 erkannt wurde.

10.5 Deckenheiz- und Kühlsystem Jahressimulation

Bezüglich der für die Beheizung mittels des Bauteilsystems anzuwendenden Regelungsstrategie wurden bauherrnseitig zwei unterschiedliche Konzepte für die Untersuchung vorgeschlagen, die im folgenden anhand der Gebäudezone Zentralraum - ein Raum identischer Geometrie wurde auch für die beabsichtigten Messungen ausgewählt und daher für die Darstellung herangezogen- vergleichend bewertet werden.

Bei Regelstrategie 1 wird ein weitgehend raumtemperaturentkoppelter Betrieb realisiert, indem die Vorlauftemperatur während der Nutzung konstant -im vorliegenden Fall 21 °C- und außerhalb der Nutzungszeit, bei Wegfall der internen Lasten, gemäß einer außentemperaturabhängigen Heizkurve gewählt wird. Es findet somit ein dauernder Heizbetrieb ohne Nachtabsenkung bzw. -schaltung statt. Als Zusatzbedingung für den Heizbetrieb wurde (vergleichbar einer Heizgrenze) die Bedingung gewählt, daß die Tagesmitteltemperatur des Vortages unter 12 °C liegt. Bei dieser Regelstrategie werden keine Raumtemperaturen erfaßt, als Stellgröße für das An- und Abschalten des Heizmittelstromes wird daher die sich ergebende Rücklauftemperatur herangezogen. Um hier ein meßbares Führungssignal zu erhalten, muß eine dauerhafte Durchströmung des Systems erfolgen. Der hierfür erforderliche Massenstrom wurde mit 10% des Auslegungsmassenstromes beziffert. Da bei dem Konzept weder eine Nacht- noch eine Wochenendabsenkung erfolgt, wird ein an der Gebäudegrenze durchgehend verfügbares Wärmepotential vorausgesetzt.

Mit Regelstrategie 2 wird ebenfalls eine zeitabhängige Steuerung des Systems vorgeschlagen, wobei die Trägheit des Systems dadurch berücksichtigt wird, daß ein Heizbetrieb von 2⁰⁰ Uhr nachts bis 15⁰⁰ nachmittags - somit zeitversetzt zur Nutzungszeit - erfolgt. Außerhalb dieser Zeit und an den Wochenenden findet keine Beheizung statt. Führungsgröße der Vorlauftemperatur bei dem vorgeschlagenen Konzept ist die Raumtemperatur, was die Auswahl eines geeigneten Führungsraumes für die zentrale Regelung bedingt. Um ein zeitgerechtes Wiederaufheizen zu ermöglichen werden bei geringen Raumtemperaturen vergleichsweise hohe Vorlauftemperaturen mit einer Obergrenze von 40°C realisiert. Die Vorlauftemperatur sinkt bei steigender Raumtemperatur dann linear auf 20°C ab, bei Raumtemperaturen oberhalb 20 °C findet keine Beheizung mehr statt. Bei Regelkonzept 2 ist die Maximalheizlast des Gebäudes der begrenzende Faktor für den Oberwert der Vorlauftemperatur.

Bezüglich der u.U. eingesetzten Kühltechnik liegen nähere Planungsgrundlagen abgesehen von dem unter 10.6 beschriebenen Bodenplattenkühler derzeit nicht vor. Eventuell

meßtechnisch zu erfassende Konzepte der Kälteerzeugung sollten daher zu gegebener Zeit Gegenstand einer gesonderten Untersuchung sein. Um verschiedene Regelstrategien hinsichtlich ihrer Auswirkung auf Raumtemperatur und Kältebedarf bei vergleichbaren Randbedingungen zu untersuchen, wird in der durchgeführten Simulation unabhängig von der Art der Kälteerzeugung bei beiden Regelstrategien von einer konstanten Vorlauftemperatur von 18 °C ausgegangen. Bei diesem Wert, den auftretenden Raum- und Deckentemperaturen - vgl. Bild 25,27 - und bei im Sommer für Büronutzung üblichen Raumluftfeuchten ist dann die Gefahr von Oberflächentauwasserbildung praktisch nicht gegeben.

Eine Kühlung ist bei Regelstrategie 1 in der Simulation nur oberhalb der Heizgrenze von 12 °C möglich, sodaß eine Beheizung und Kühlung am selben Tag ausgeschlossen ist. Wie beim Heizbetrieb erfolgt die Steuerung des Heizmittelstromes anhand der Rücklauftemperatur, wofür wiederum ein Mindestmassenstrom von 10% des Auslegungsmassenstromes für den Erhalt der Meßgröße erforderlich ist. Der Massenstrom wird auf 100% hochgefahren, wenn die Rücklauftemperatur größer als 23,5 °C ist und - im Sinne einer Hysterese – wieder gedrosselt, sobald der Rücklauf weniger als 21,5 °C aufweist.

Bei Regelstrategie 2 wird der Kühlbetrieb an zwei Bedingungen geknüpft. Zum einen ist ein Kühlen nur dann möglich, wenn am Vortag kein Heizbetrieb stattgefunden hat, die zweite Bedingung ist, daß die Raumtemperatur um 18 Uhr einen Maximalwert von 25 °C überschreitet. Beim Zusammentreffen beider Bedingungen findet dann eine nächtliche Kühlung bis längstens 7 Uhr morgens statt, welche auch dann abgebrochen wird, wenn die Raumtemperatur unter 22 °C sinkt. Wiederum ist bei diesem Regelkonzept die geeignete Auswahl eines Führungsraumes für die zentrale Regelung erforderlich.

Die Beschreibung der Regelstrategien macht deutlich, welche Vielfalt an Untersuchungen hinsichtlich Konzept und Einflußparametern mit dem System möglich sind. Die beschriebenen Konzepte stellen naturgemäß nur eine klein Auswahl von denkbare Strategien und Parametersätzen dar, zeigen jedoch bereits wesentliche Unterschiede auf.

Die Bilder 25 und 27 zeigen für die beiden Regelstrategien die Jahresverläufe von Systemtemperaturen und eingebrachter Heiz- bzw. Kühlleistung, die Bilder 26 und 28 - quasi im "vergrößerten Maßstab" - die korrespondierenden Monatsverläufe für den Anfangsmonat.

Zunächst ist festzuhalten, daß gegenüber dem Auslegungsfall bei Berücksichtigung von inneren und äußeren Lasten infolge der sinkenden Heizlast noch einmal deutlich verringerte Vorlauftemperaturen des Systems für die Beheizung ausreichend sind. Mit den vorgegebenen Werten ist der Heizwärmebedarf der betrachteten Gebäudezone (und entsprechend den angesetzten Lasten auch der übrigen Zonen) nur noch sehr gering. Beide Regelstrategien führen denn auch trotz der gegenüber der Auslegung reduzierten Vorlauftemperatur zu Raumtemperaturen von mehr als 20 °C, vgl. Bild 25 und 27. Am deutlichsten wird der Unterschied zwischen den Regelstrategien bei Vergleich der monatlichen Darstellung. Während bei Regelstrategie 1 praktisch ein dauerhafter Betrieb der Anlage erfolgt (sei es nun mit 10%-igem oder vollem Massenstrom) ist bei Regelkonzept 2 eine Zuführung von Energie in das System praktisch nur nach erfolgter Wochenendabsenkung - dann aller-

dings mit entsprechend hohen Leistungen - erforderlich. Bei Strategie 1 erfolgt, je nach Raumzustand, entweder eine Wärmezufuhr oder Wärmeabfuhr (rote Kurve im Bild 26 unten), bei Regelstrategie 2 ausschließlich eine Wärmezufuhr. Zu beachten ist, daß für Regelstrategie 2 offenbar günstige Parameter gewählt wurden, da die Raumtemperatur außer an den Wochenenden nachts ziemlich genau auf 20 °C absinkt, so daß wochentags ein Nachheizen nicht erforderlich wird. Die blauen Kurven in Bild 26 und 28 stellen die Wärmeabgabe bzw. Wärmeaufnahme als Summe aus Decke und Boden dar und verdeutlichen den Zeitversatz an der Oberfläche gegenüber der wasserseitigen Leistungsabgabe bzw. -aufnahme sowie die Reaktion der Oberflächen auf die instationären internen und äußeren Lasten.

Im Kühlbetrieb lassen sich mit der Regelstrategie 1, bei der eine permanente Kühlung erfolgen kann, sehr gleichmäßige Raumtemperaturen auf geringem Niveau realisieren, wohingegen bei Strategie 2 um 2-3 K höhere Temperaturen im Sommer auftreten. Auch ist, um die dargestellten Temperaturen zu erlangen, bei Regelstrategie 2 der Nutzer selbst mehr "gefordert". Programmtechnisch wurde ihm nämlich mit dem Ansatz für die erhöhte Lüftung mit Schaltgrenze oberhalb 24 °C ein günstiges Lüftungsverhalten häufiger unterstellt, wie an den deutlichen Ausschlägen der Raumlufttemperatur (rote Kurven) nach unten erkennbar ist. Ohne diesen Ansatz würde der Vergleich hinsichtlich der Raumtemperaturen noch günstiger für Regelstrategie 1 ausfallen. Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß auch die bei Regelstrategie 2 vorhandenen Raumtemperaturen im Sommer sicherlich noch als sehr angenehm zu bezeichnen sind, eher sogar bei Regelstrategie 1 die Gefahr zu kühler Raumluftzustände besteht.

Der Vergleich der Heiz- und Kühlleistung zeigt bei Regelstrategie 1 einen verhältnismäßig gleichmäßigen Verlauf mit gleichmäßigen, eher geringen Spitzen wohingegen die Leistungsspitzen insbesondere im Kühlbetrieb bei Regelstrategie 2 mehr als doppelt so hoch liegen.

Bei Betrachtung der Kurven entsteht leicht der Eindruck, daß Strategie 2 hinsichtlich des Energieeinsatzes zumindest im Kühlbetrieb die ungünstigere Variante darstellt, eine Auswertung des Heizwärme- bzw. Kühlkältebedarfes - Bild 29 - zeigt jedoch genau das gegenteilige Ergebnis. Nicht nur der (ohnehin sehr kleine) Heizwärmebedarf ist bei Regelstrategie 2 kleiner als bei Regelstrategie 1, auch der Kühlkältebedarf ist (bei allerdings höherem Raumtemperaturniveau) um mehr als die Hälfte gesunken. Die Bedarfswerte stellen das Integral über den positiven(Heizen) bzw. negativen (Kühlen) Zweig des Jahresverlaufes der Leistung dar. Während somit bei Regelstrategie 1 kleine Leistungen über lange Zeiträume in das System eingebracht werden, ist es bei Regelstrategie 2 gerade umgekehrt indem große Leistungsspitzen über sehr kurze Zeiträume vorliegen. Eine Anlagendimensionierung unter Berücksichtigung der jeweiligen Regelstrategie wird damit unabdingbar.

10.6 Bodenplattenkühler

Für die beschriebene Zentralraumgeometrie und den zugehörigen Nutzungsrandbedingungen

gen wird als Kältereservoir ein sogenannter Bodenplattenkühler untersucht. Dabei werden Rohrregister in der Bodenplatte des Gebäudes verlegt, welche ohne unterseitige Dämmschichten mit dem sich darunter befindenden Erdreich in thermischem Kontakt steht. Die Rohrregister des Decksystems werden mit den Rohrregistern in der Bodenplatte verbunden und es erfolgt ein Wärmeaustausch über das in den Rohren strömende Wasser. Bei diesem System steht keine beliebig anpaßbare Kälteleistung zur Verfügung, sondern eine von den Temperaturverhältnissen im Erdreich und Kellerraum abhängige, die jedoch praktisch ohne Betriebskosten genutzt werden kann. Die Raumtemperatur im zu kühlenden Raum stellt sich entsprechend der übertragenen Wärmemengen frei ein. Der wichtigste Parameter bei diesem System sind dabei die im Erdreich herrschenden Temperaturen, die u.a. stark von den Grundwasserverhältnissen abhängen können. Zur Quantifizierung dieses Einflusses werden daher in Unkenntnis der real zu erwartenden Bedingungen Berechnungsergebnisse zweier Varianten für die Verhältnisse im Erdreich dargestellt. In Variante 1 wird von einer konstanten Erdreichtemperatur von 10 °C in 12 m Tiefe unter der Bodenplatte ausgegangen, wohingegen bei Variante 2 die gleiche Temperatur bereits 1 m unter der Bodenplatte ansteht. Die Verhältnisse von Variante 1 können in unseren Breiten praktisch immer angesetzt werden, Variante 2 entspricht eher dem Fall fließenden Grundwassers unterhalb des Gebäudes.

Der Vergleich der Ergebnisse beider Varianten, Bild 30 und 31, verdeutlicht den überraschenden Einfluß des Parameters "Erdreich". Für Variante 1 ist das Kältepotential des Bodenplattenkühlers bereits nach einigen Wochen des Betriebes erschöpft, die Bodentemperaturen steigen rasch an und es lassen sich dann nur noch geringe Kälteleistungen erzielen. Eine Regeneration des Bodens in der sich an die Kühlperiode anschließenden Jahreszeit erfolgt nicht, die Erdreichtemperaturen am Ende des Simulationszeitraumes sind etwa 4K höher als zu Beginn (Startwert 14 °C). Anders die Verhältnisse bei Variante 2. Hier steht über lange Zeiten der Kühlperiode eine größere Kälteleistung zur Verfügung, so daß die Raumtemperaturen gegenüber dem Fall ohne Kühlsystem um etwa 2-3 K gesenkt werden können. Zwar zeigt sich auch hier in den Hitzeperioden des Hochsommers bei praktisch vorhandenem Dauerbetrieb des Systems eine gewisse "Erschöpfung" des Kältereservoirs, welche jedoch im Spätsommer und Herbst bei ausgeschalteter Anlage rasch wieder abgebaut wird. Eine Erhöhung der Erdreichtemperatur im Jahresverlauf ist bei dieser Variante nicht vorhanden. Die Dauerleistung des Systems liegt für Variante 2 bei etwa 200 W, wohingegen bei nur kurzzeitigem Betrieb im Frühling und Herbst Leistungsspitzen bis hin zu 1000 W erzielt werden.

11. Literatur

- [1] Hauser, G.: Rechnerische Vorherbestimmung des Wärmeverhaltens großer Bauten. Dissertation Universität Stuttgart (1977).
- [2] Hauser, G.: Passive Sonnenenergienutzung durch Fenster, Außenwände und temporäre Wärmeschutzmaßnahmen - Eine einfache Methode zur Quantifizierung

durch k_{eq} -Werte. HLH 34 (1983), H. 3, S. 111-112, H. 4, S. 144-153, H. 5, S. 200-204, H. 6, S. 259-265.

- [3] Fort, K.: Dynamisches Verhalten von Fussbodenheizungen. Dissertation, ETH Zürich 1989.
- [4] DIN 4108-4: Wärmeschutz im Hochbau. Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte. (Nov. 1991)
- [5] E DIN 4108-4: Wärmeschutz im Hochbau. Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte. (Okt. 1998)
- [6] Esdorn, H.; Fortak, H. und Jahn, A: Entwicklung von Testreferenzjahren (TRY) für Klimaregionen der Bundesrepublik Deutschland. Statusbericht 1985 "Rationelle Energieverwendung im Haushalt und Kleinverbrauch" des BMFT. Verlag TÜV Rheinland (1985), S. 424-437.
- [7] Testreferenzjahre - Meteorologische Grundlagen für technische Simulationen von Heiz- und raumluftechnischen Anlagen. BINE, Profi Info-Service (Okt. 1991).
- [8] Pottler, K.; Beck, A. und Benz, N.: Testreferenzjahr. Sonnenenergie 4/1996.
- [9] DIN 4701, Teil1: Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden - Grundlagen der Berechnung. (März 1983).
- [10] DIN 4701, Teil2: Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden - Tabellen, Bilder, Algorithmen. (März 1983).
- [11] Otto F. und Hauser, G.: Planungsinstrument für das sommerliche Wärmeverhalten von Gebäuden. Forschungsbericht des Ingenieurbüros Hauser, Baunatal, Förderungs-Nr. Bundesbauministeriums B 15-8001 95-2 (Nov. 1997).

Tabelle 1: Zusammenstellung der zugrunde gelegten Bauteile.

	Bauteil	U	Baustoff			
			s [mm]	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m·K)]	
1	Dach	U =0,19 W/(m ² K)	Dämmstoff	200,0	15	0,04
			Stahlbeton	250,0	2400	2,1
2	Dach Terrasse	U =0,19 W/(m ² K)	Dämmstoff	200,0	15	0,04
			Stahlbeton	250,0	2400	2,1
3	Aussenwand	U =0,18 W/(m ² K)	Klinker	115,0	2000	0,96
			Dämmstoff	200,0	8	0,04
			Stahlbeton	200,0	2400	2,1
			Gipsputz	10,0	1200	0,35
4	Aussenwand	U =0,30 W/(m ² K)	Dämmstoff	120,0	8	0,04
			Stahlbeton	250,0	2400	2,1
5	Bodenplatte	U =0,29 W/(m ² K)	Zementestrich	50,0	2400	1,4
			Dämmstoff	120,0	15	0,04
			Stahlbeton	400,0	2000	2,1
6	Decke n.u.g. aussen	U =0,19 W/(m ² K)	Stahlbeton	200,0	2000	2,1
			Dämmstoff	200,0	15	0,04
7	Innenwand 11,5	U =2,08 W/(m ² K)	Gipsputz	10,0	1200	0,35
			Kalksandstein	115,0	1400	0,7
			Gipsputz	10,0	1200	0,35
8	Innenwand 17,5	U =1,76 W/(m ² K)	Gipsputz	10,0	1200	0,35
			Kalksandstein	175,0	1400	0,7
			Gipsputz	10,0	1200	0,35
9	Innenwand Lehm	U =1,49 W/(m ² K)	Massivlehm	115,0	1800	0,95
			Luftschicht	365,0	/Λ = 0,17 m ² K/W	
			Massivlehm	115,0	1800	0,95
10	Innenwand Beton	U =2,82 W/(m ² K)	Stahlbeton	200	2400	2,1

Tabelle 1: Fortsetzung

	Bauteil		Baustoff			
			s [mm]	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m·K)]	
11	Geschossdecke	U =0,98 W/(m ² K)	Zementestrich Dämmstoff Stahlbeton	80,0 20,0 250,0	2000 15 2400	1,4 0,04 2,1
12	Decke ü. Hausanschl.	U =0,36 W/(m ² K)	Dämmstoff Stahlbeton	100,0 250,0	15 2400	0,04 2,1
13	Kellerdecke	U =0,68 W/(m ² K)	Zementestrich Dämmstoff Stahlbeton	50,0 40,0 180,0	2000 15 2400	1,4 0,04 2,1
14	Innenw. Keller	U =2,36 W/(m ² K)	Kalksandstein	115,0	1400	0,7
15	Innenw. Keller	U =1,66 W/(m ² K)	Kalksandstein	240,0	1400	0,7
16	Innenw. Keller	U =2,82 W/(m ² K)	Stahlbeton	200,0	2400	2,1
17	mobile Trennw.	U =0,47 W/(m ² K)	Holzwerkstoffplatte Dämmstoff Holzwerkstoffplatte	16,0 68,0 16,0	700 15 700	0,17 0,04 0,17
18	Innenwand Glas	U =2,80 W/(m ² K)	Glas Luftschicht Glas	4,0 4,0	2500 1/ Λ = 0,17 m ² K/W 2500	0,8 0,8
19	Fenster	$k_V = 0,7$ W/(m ² ·K), $g = 0,42$ ($k_V = 1,2$ W/(m ² ·K), $g = 0,58$)				
20	Rahmen	$k_R = 1,6$ W/(m ² ·K), Rahmenanteil 20%				

Tabelle 2: Zusammenstellung der bei den Simulationsrechnungen zugrunde gelegten Nutzungsrandbedingungen

Raum	Sollwert der operativen Temperatur		interne Wärmelast		Infiltrationsluftwechsel [h ⁻¹]	
	wochentags 8-17 Uhr	sonst	wochentags 8-17 Uhr	sonst	wochentags 8-17 Uhr	sonst
1	18	10	3 W/m ²	0	0,3	0,1
2	10	10	0	0	0	0
3	10	10	2 W/m ²	0	0	0
4	10	10	0	0	0	0
5	10	10	0	0	0	0
6	10	10	0	0	0	0
7	10	10	0	0	0	0
8	18	10	3 W/m ²	0	0,3	0,1
9	20	15	0	0	0,1	0,1
10	20 (8-12 Uhr)	15	1600W (8-12Uhr)	0	0,1	0,1
11	18	15	400W (10-14Uhr)	0	0,3	0,1
12	20	15	250W	0	0,1	0,1
13	20	15	250W	0	0,1	0,1
14	10	10	0	0	0,3	0,3
15	10	10	0	0	0	0
16	10	10	0	0	0,3	0,3
17	18	10	3 W/m ²	0	0,3	0,1
18	20	15	400	0	0,1	0,1
19	20	15	400	0	0,1	0,1
20	20	15	400	0	0,1	0,1
21	20	15	400	0	0,1	0,1
22	20	15	200	0	0,1	0,1
23	10	10	0	0	0	0
24	18	10	3 W/m ²	0	0,3	0,1
25	20	15	400	0	0,1	0,1
26	20	15	400	0	0,1	0,1
27	20	15	400	0	0,1	0,1
28	20	15	400	0	0,1	0,1
29	20	15	400	0	0,1	0,1
30	20	15	0	0	0,1	0,1
31	20	15	400	0	0,1	0,1
32	10	10	0	0	0	0

Tabelle 4: Variantenvergleich Deckenheizung Zentralbüro im Auslegungsfall

- 1) Massenstrom 10 und 5,5 kg/(m²h)
- 2) Verlegeabstand 15 und 20 cm
- 3) Vorlauftemperatur 25 und 30 °C

Massenstr. kg/(m ² h)	Geometrie	VZ [cm]	LW [1/h]	Temp. [°C]	Leistung [W]	VL-Temp [°C]	RL-Temp [°C]	TDecke [°C]	TBoden [°C]	Decke [W]	Boden [W]
10	ZBüro 26m ²	20	0,3	20,1	576,9	25,0	23,0	21,8	20,3	484,7	90,8
10	ZBüro 26m ²	15	0,3	20,4	583,5	25,0	23,0	22,2	20,7	490,5	91,8
10	ZBüro 26m ²	20	0,3	24,0	713,4	30,0	27,6	26,1	24,3	570,2	95,0
10	ZBüro 26m ²	15	0,3	23,5	849,1	30,0	27,1	25,9	23,7	666,5	71,0
5,5	ZBüro 26m ²	20	0,3	19,2	561,9	25,0	21,5	20,9	19,5	472,1	88,4
5,5	ZBüro 26m ²	15	0,3	19,6	567,7	25,0	21,5	21,3	19,8	477,3	89,3
5,5	ZBüro 26m ²	20	0,3	23,4	637,8	30,0	26,0	25,3	23,7	535,8	100,4
5,5	ZBüro 26m ²	15	0,3	23,8	644,4	30,0	26,0	25,8	24,1	541,7	101,5

Randbedingungen: - Auslegungsfall, $\vartheta_a = -12$ °C

- keine Wärmegewinne

- Infiltrationsluftwechsel $n=0,3$ h⁻¹

- 1 Heizkreis, DN 20 x 2,3

Tabelle 5: Variantenvergleich Deckenheizung Besprechungsraum im Auslegungsfall

- 1) Massenstrom 10 und 5,5 kg/(m²h)
- 2) Verlegeabstand 15 und 20 cm
- 3) Vorlauftemperatur 25 und 30 °C

Massenstr. kg/(m ² h)	Geometrie	VZ [cm]	LW [1/h]	Temp. [°C]	Leistung [W]	VL-Temp [°C]	RL-Temp [°C]	TDecke [°C]	TBoden [°C]	Decke [W]	Boden [W]
10	Bespr 62m ²	20	0,3	16,6	2409,4	25,0	21,7	19,5	17,1	2030,0	381,6
10	Bespr 62m ²	15	0,3	17,1	2457,4	25,0	21,6	20,2	17,7	2071,2	389,3
10	Bespr 62m ²	20	0,3	20,4	2740,3	30,0	26,2	23,8	21,0	2304,6	432,1
10	Bespr 62m ²	15	0,3	21,1	2794,9	30,0	26,1	24,5	21,6	2351,4	440,8
5,5	Bespr 62m ²	20	0,3	15,3	2304,7	25,0	19,2	18,2	15,8	1942,1	364,9
5,5	Bespr 62m ²	15	0,3	15,8	2346,1	25	19,1	18,7	16,3	1977,7	371,7
5,5	Bespr 62m ²	20	0,3	19,0	2621,4	30,0	23,4	22,2	19,5	2204,4	413,2
5,5	Bespr 62m ²	15	0,3	19,6	2668,6	30,0	23,3	22,9	20,1	2245,0	420,8

- Randbedingungen:**
- Auslegungsfall, $\vartheta_a = -12 \text{ °C}$
 - keine Wärmegewinne
 - Infiltrationsluftwechsel $n=0,3 \text{ h}^{-1}$
 - 2 Heizkreise, DN 20 x 2,3

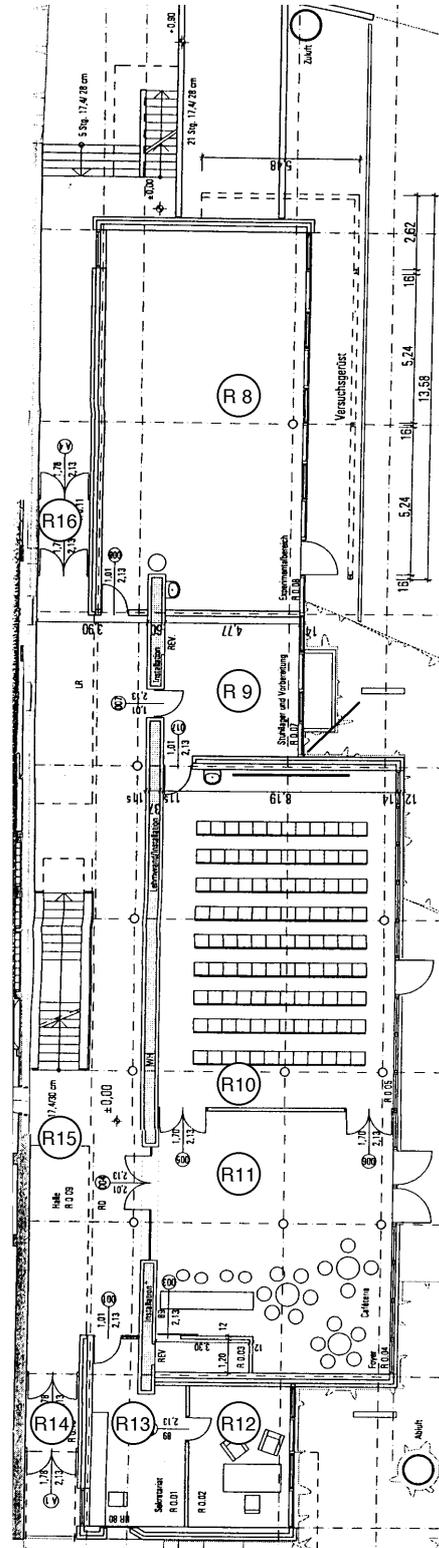
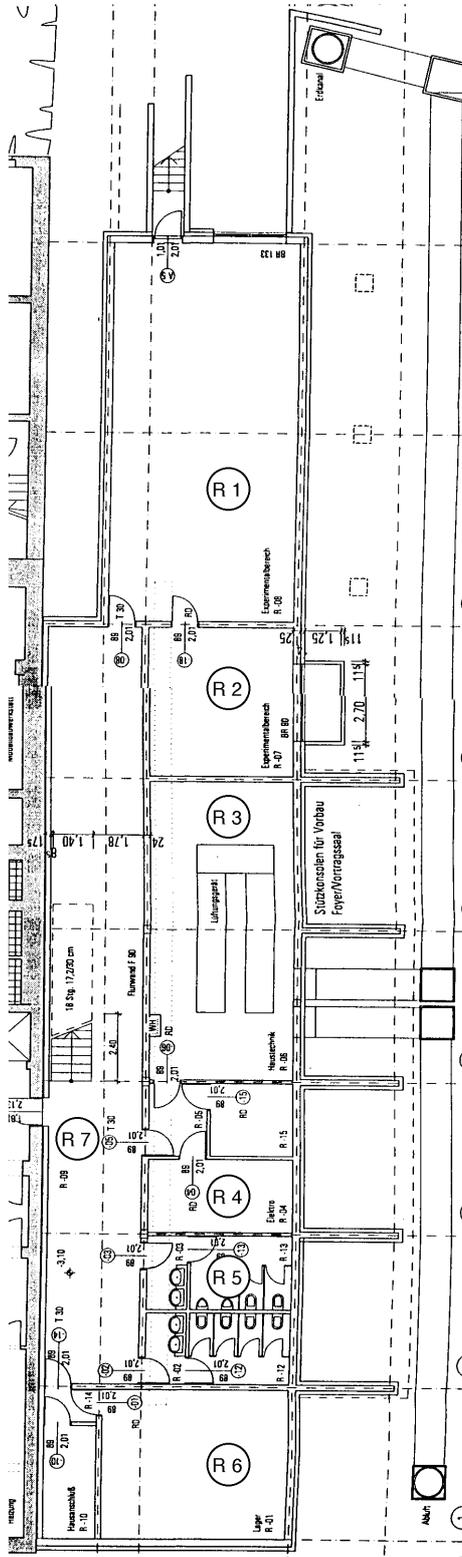


Bild 1: Kellergeschoß

Bild 2: Erdgeschoß

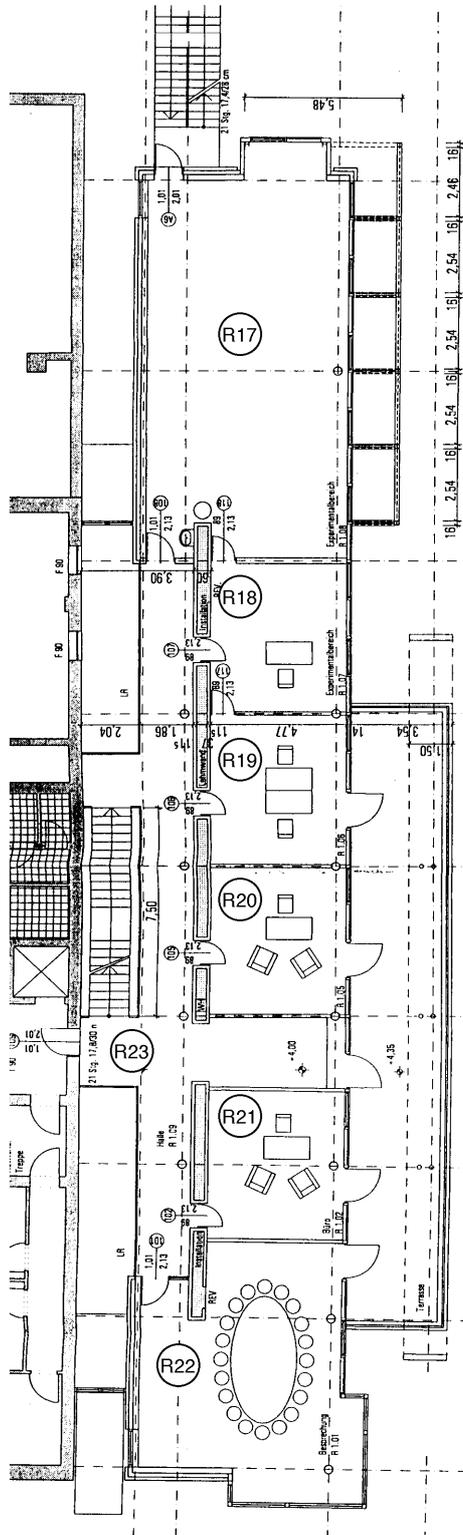


Bild 3: 1. Obergeschoß

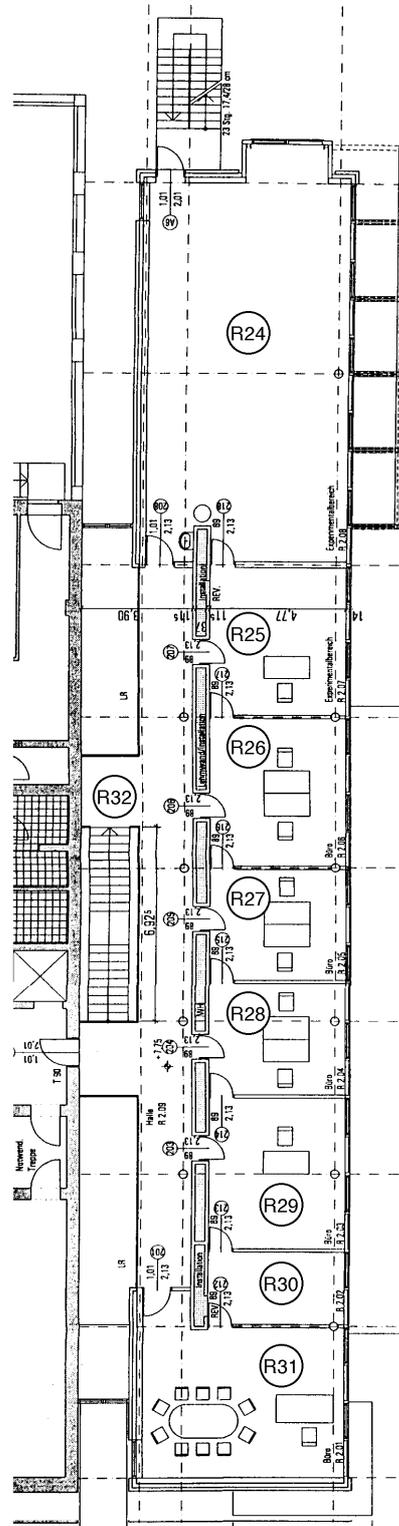


Bild 4: 2. Obergeschoß

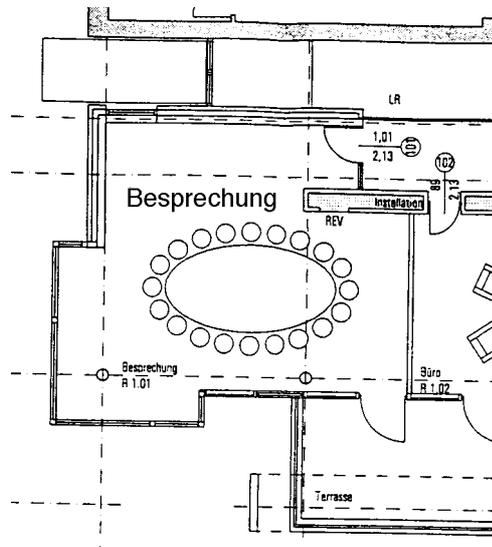


Bild 5: Besprechungsraum

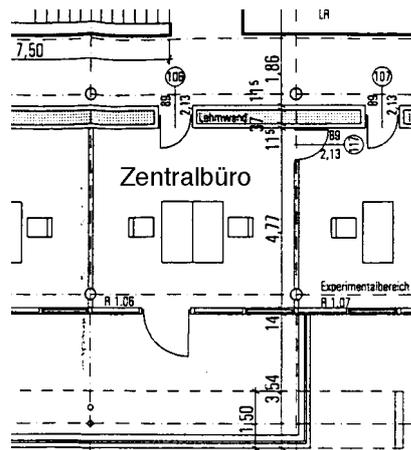


Bild 6: Zentralbüro

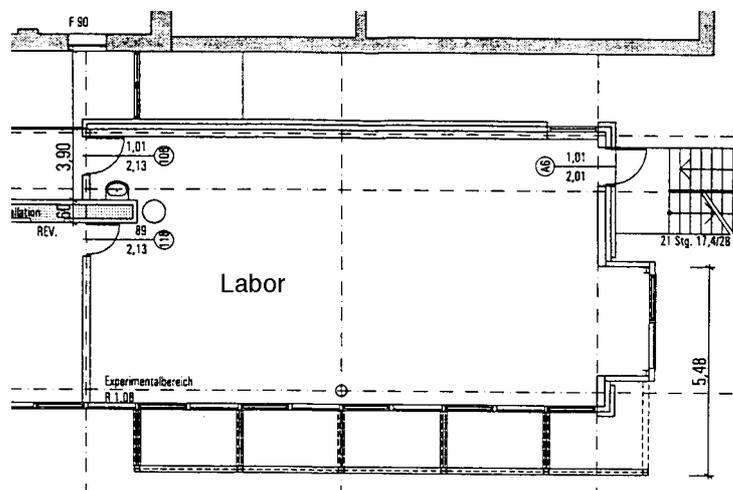


Bild 7: Labor

Vergleich der Verglasungsart

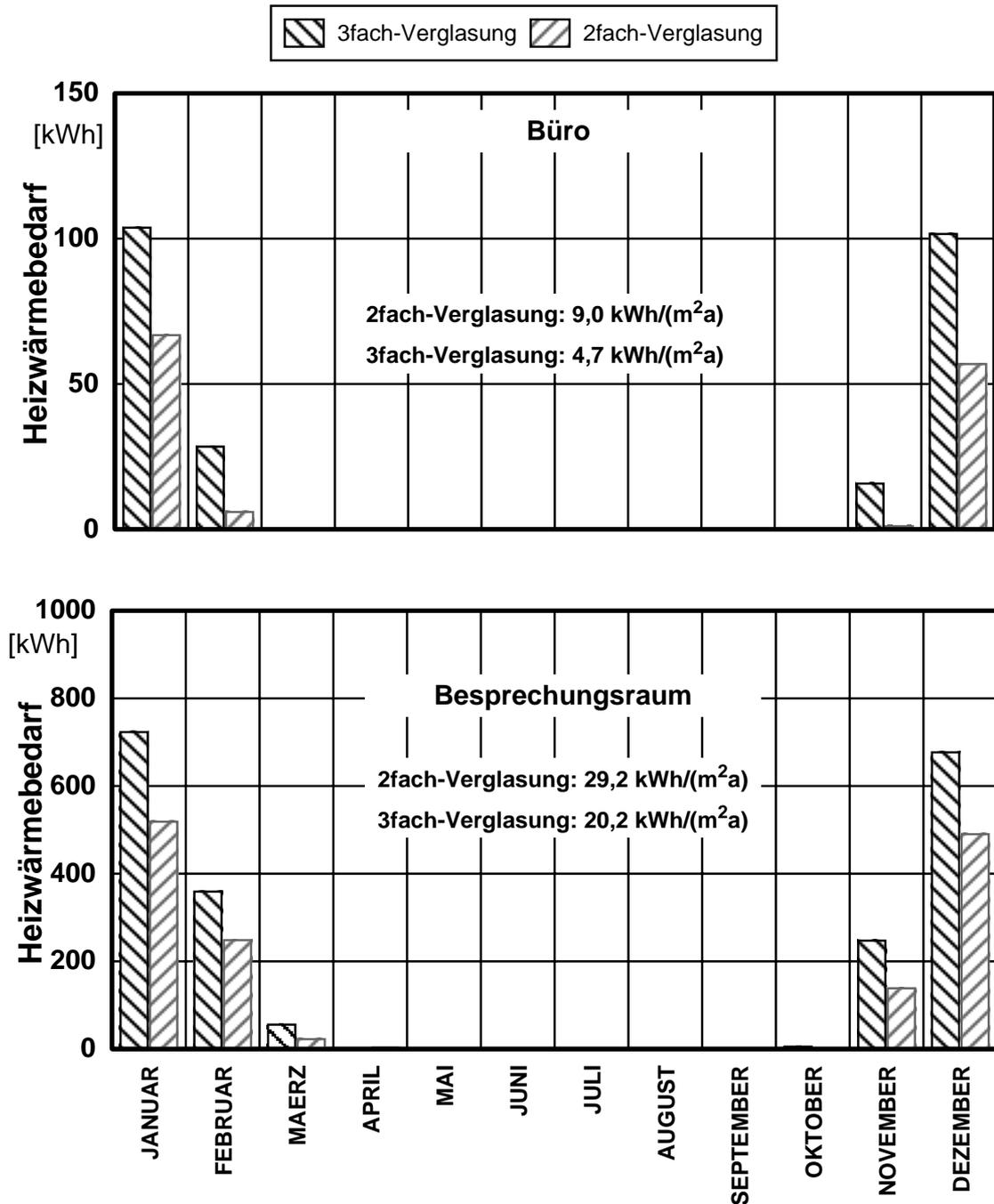


Bild 8: Vergleich des Jahresbedarfes für Heizwärme bei Verwendung von 3fach- ($k_v=0,7$ W/(m²K), $g=0,42$) bzw. 2fach- ($k_v=1,2$ W/(m²K), $g=0,58$) Verglasungen (Wärmeschutzverglasung).

Vergleich der Verglasungsart, Laborbereich

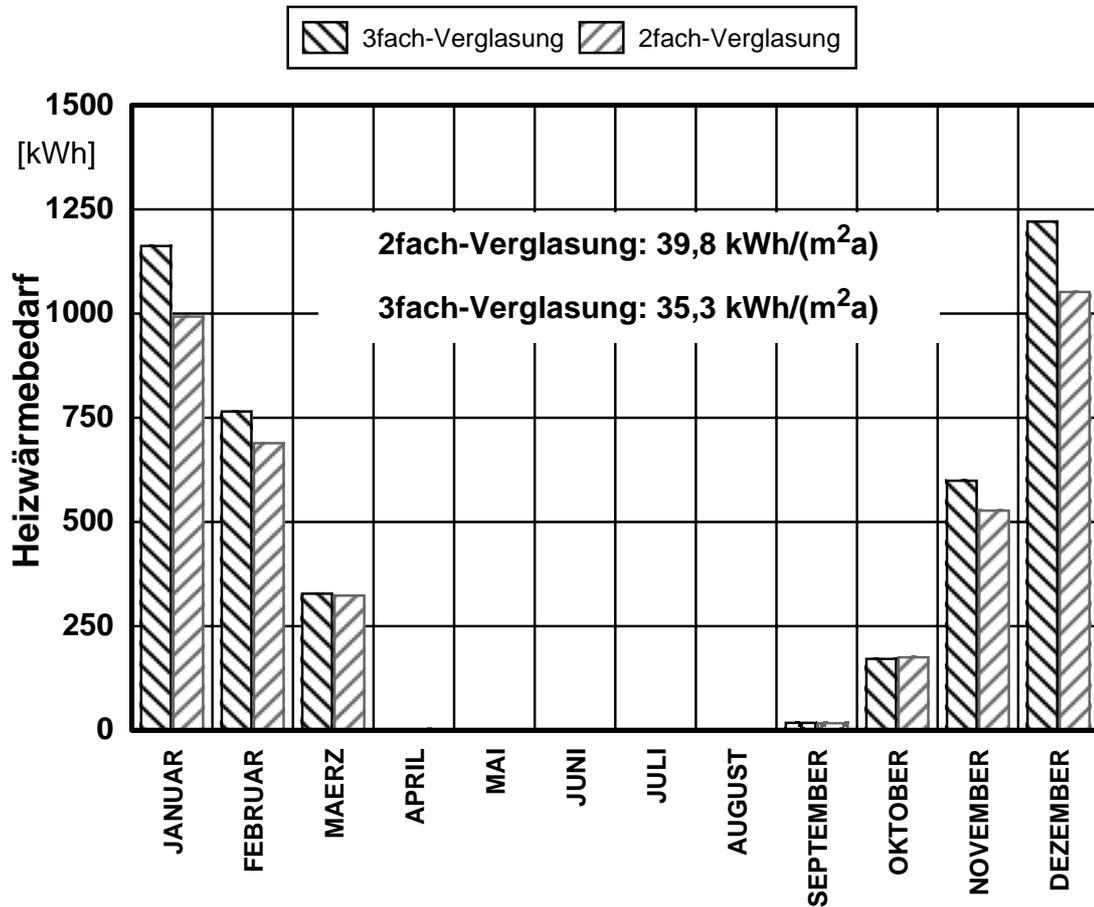
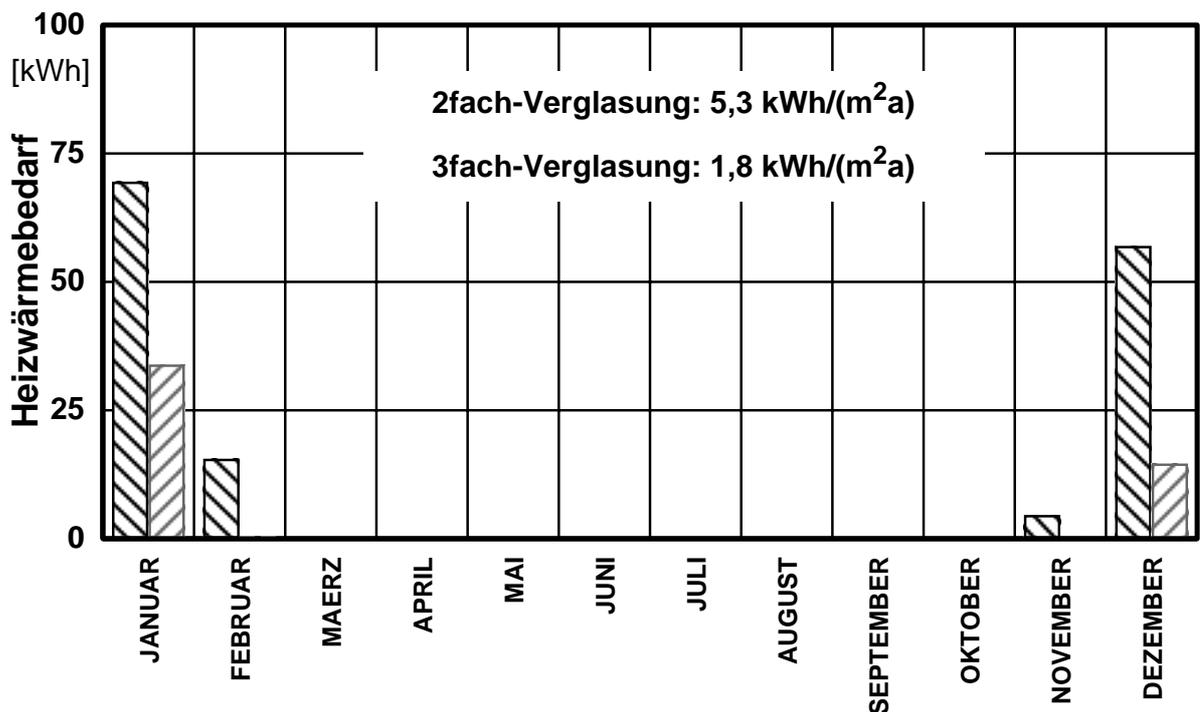
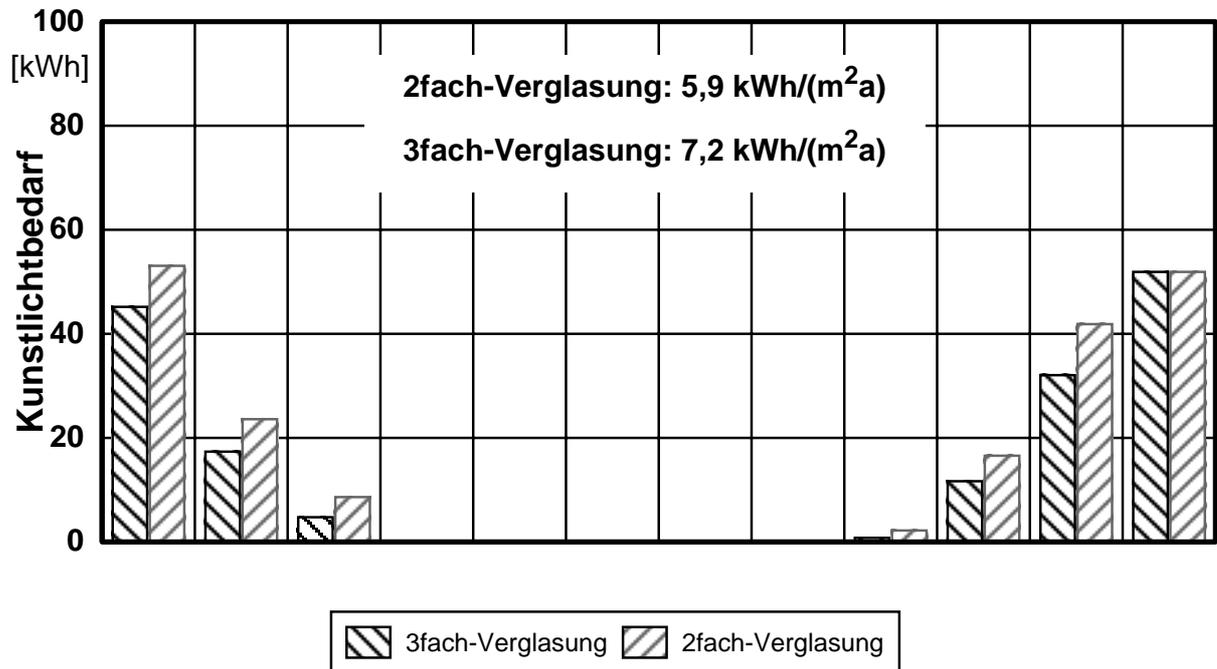


Bild 9: Vergleich des Jahresbedarfes für Heizwärme bei Verwendung von 3fach- ($k_v=0,7$ W/(m²K), $g=0,42$) bzw. 2fach- ($k_v=1,2$ W/(m²K), $g=0,58$) Verglasungen (Wärmeschutzverglasung). Laborbereich.

Vergleich der Verglasungsart, Büroraum



Summe 2fach-Verglasung: 11,2 kWh/(m²a)

Summe 3fach-Verglasung: 8,9 kWh/(m²a)

Bild 10: Vergleich des Jahresbedarfes für Kunstlicht und Heizwärme bei Verwendung von 3fach- ($k_v=0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $g=0,42$) bzw. 2fach- ($k_v=1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $g=0,58$) Verglasungen (Wärmeschutzverglasung).

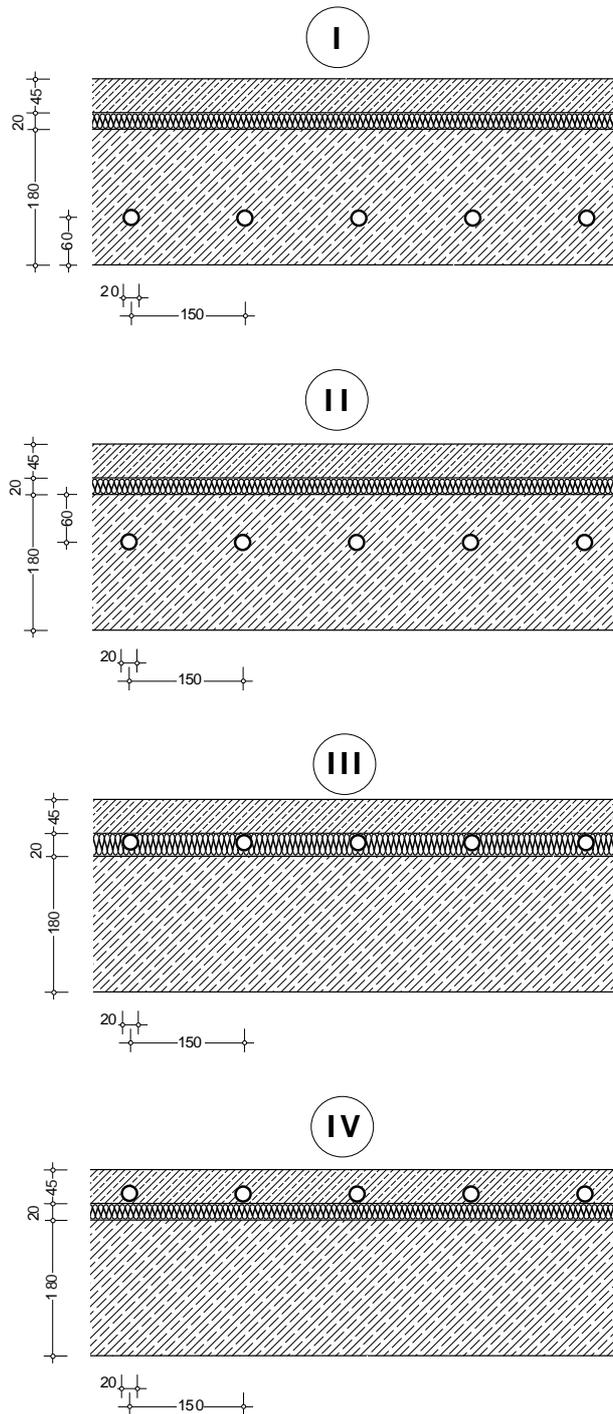


Bild 11: In der Voruntersuchung betrachtete Massivvarianten des Geschoßdeckenaufbaus

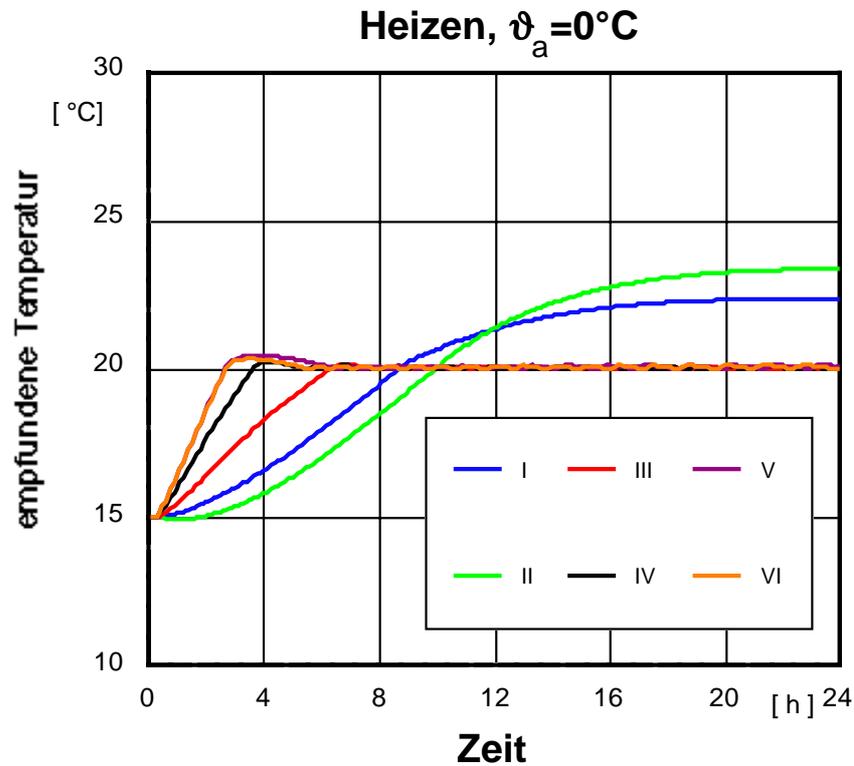


Bild 12: Verlauf der empfundenen Temperatur bei einem Sprung der Vorlauftemperatur von 15 auf 50 °C zur Zeit t=0 für die betrachteten Deckenaufbauten.

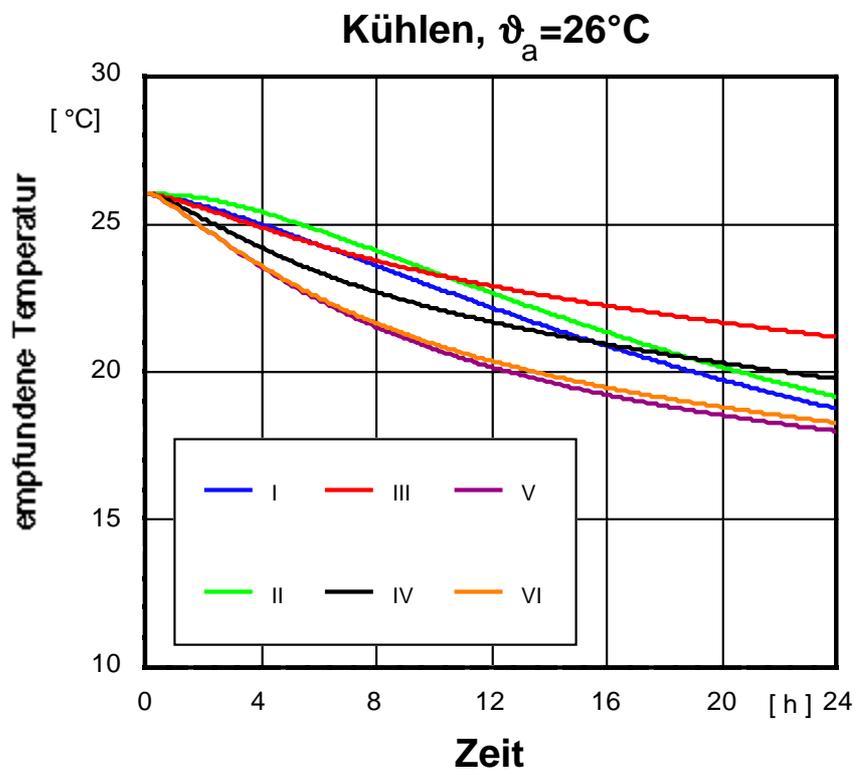


Bild 13: Verlauf der empfundenen Temperatur bei einem Sprung der Vorlauftemperatur von 26 auf 12 °C zur Zeit t=0 für die betrachteten Deckenaufbauten.

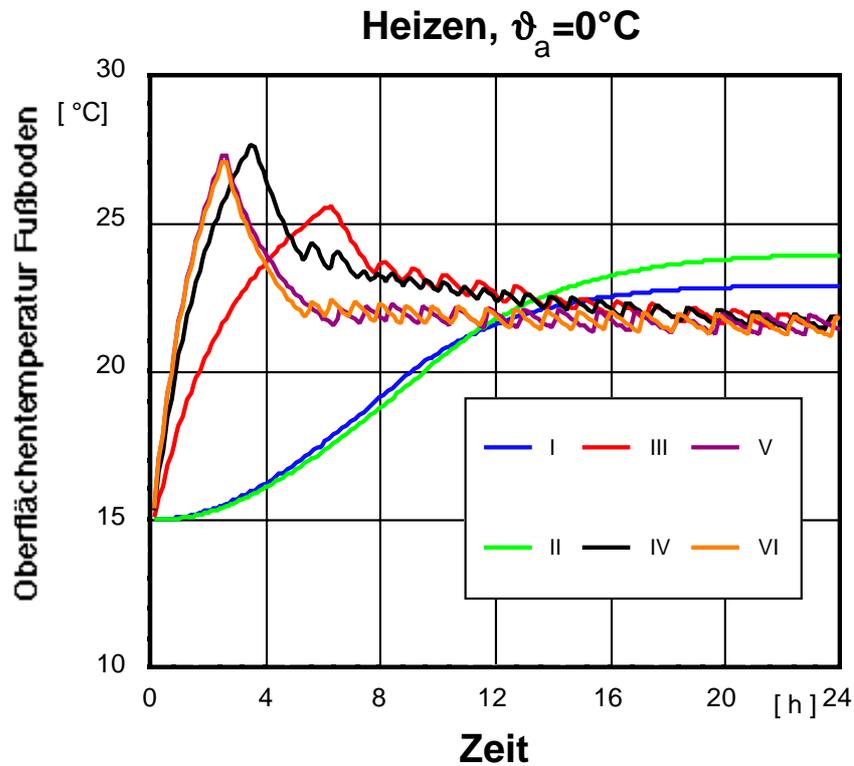


Bild 14: Verlauf der Oberflächentemperatur bei einem Sprung der Vorlauftemperatur von 15 auf 50 °C zur Zeit $t=0$ für die betrachteten Deckenaufbauten.

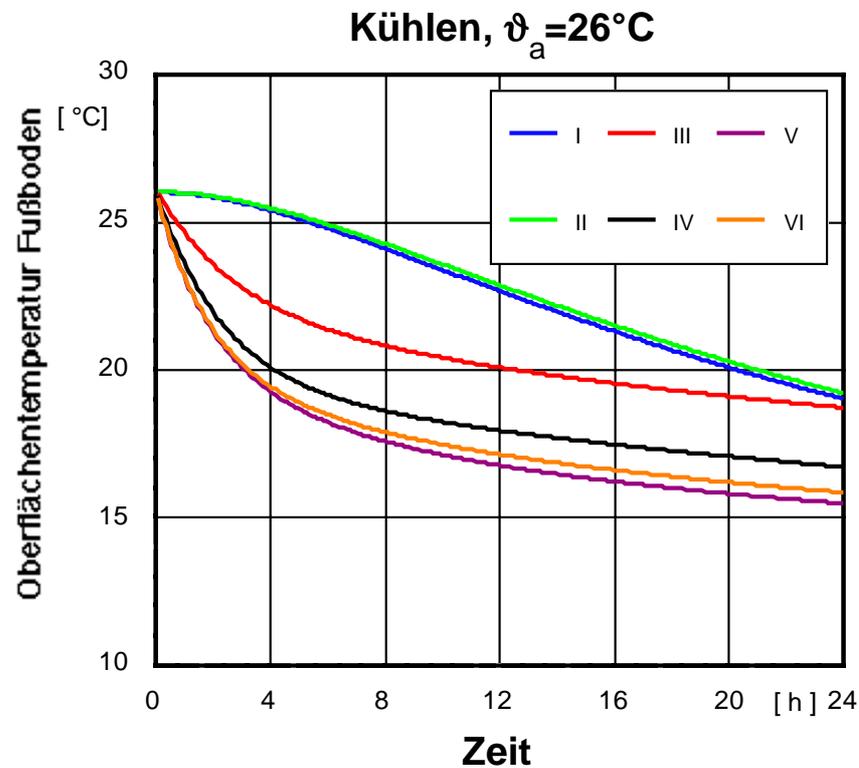


Bild 15: Verlauf der Oberflächentemperatur bei einem Sprung der Vorlauftemperatur von 26 auf 12 °C zur Zeit $t=0$ für die betrachteten Deckenaufbauten.

Übertemperaturgradstunden

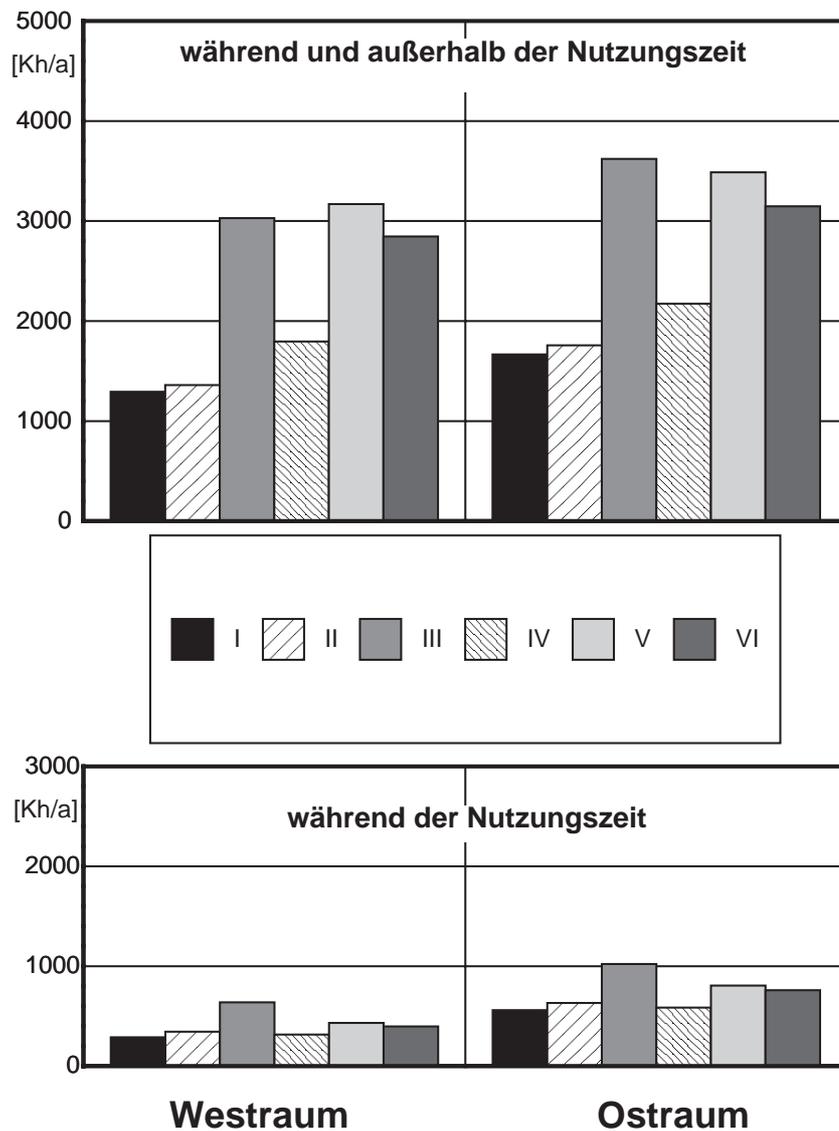


Bild 16: Darstellung der Übertemperaturgradstunden GH_{26} für einen zentral gelegene Ost- und Westbüroraum für die betrachteten Deckenaufbauten. Komplettes Jahr und Auswertung nur für die Nutzungszeit.

Auslegungsfall $\vartheta_a = -12^\circ\text{C}$

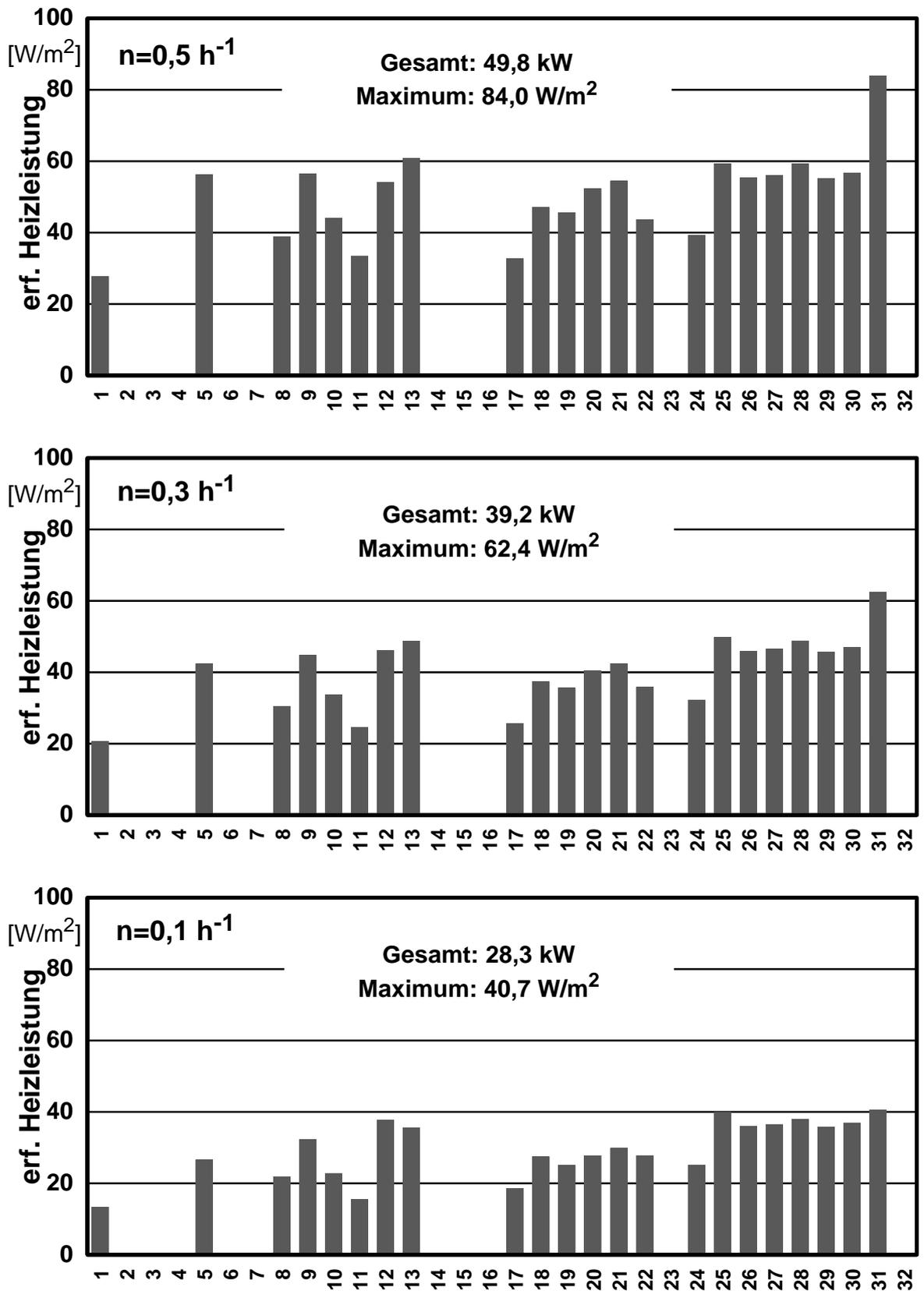


Bild 17: Zur Beheizung raumweise erforderliche Heizlast im Auslegungsfall für verschiedene Werte der Luftwechselzahl.

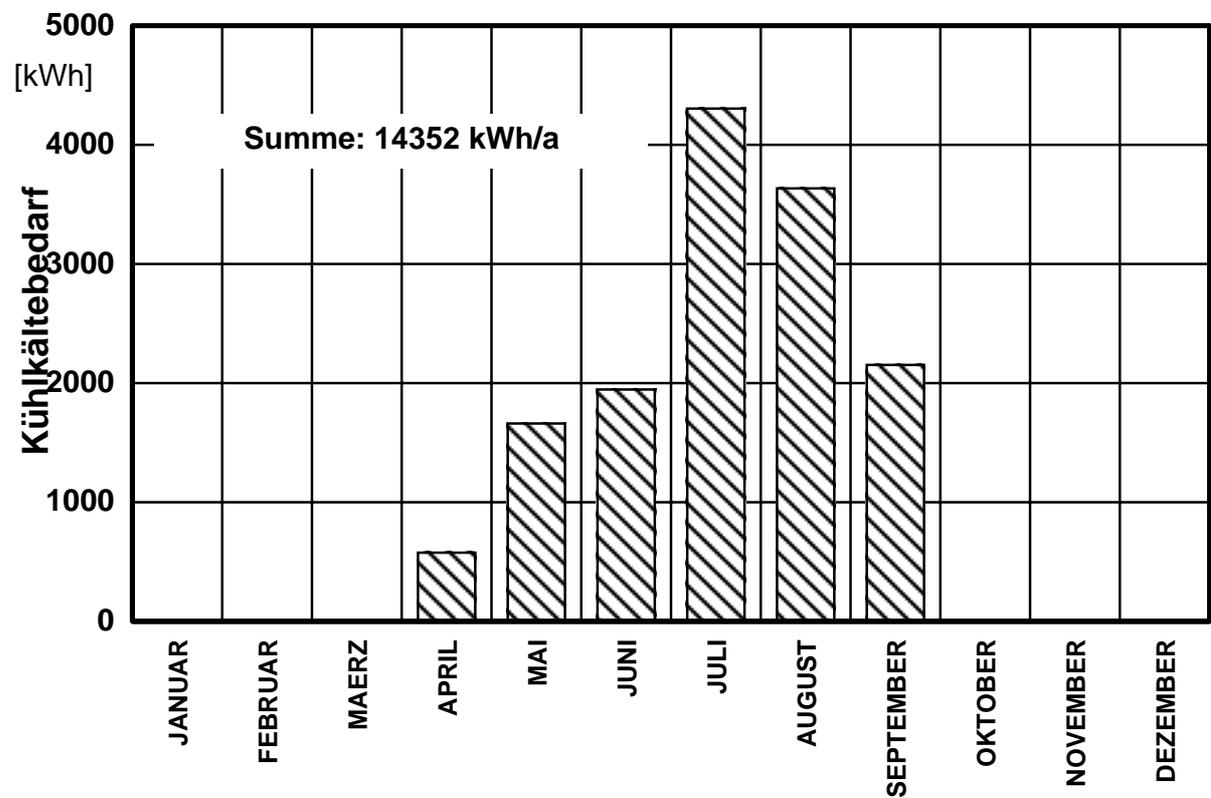
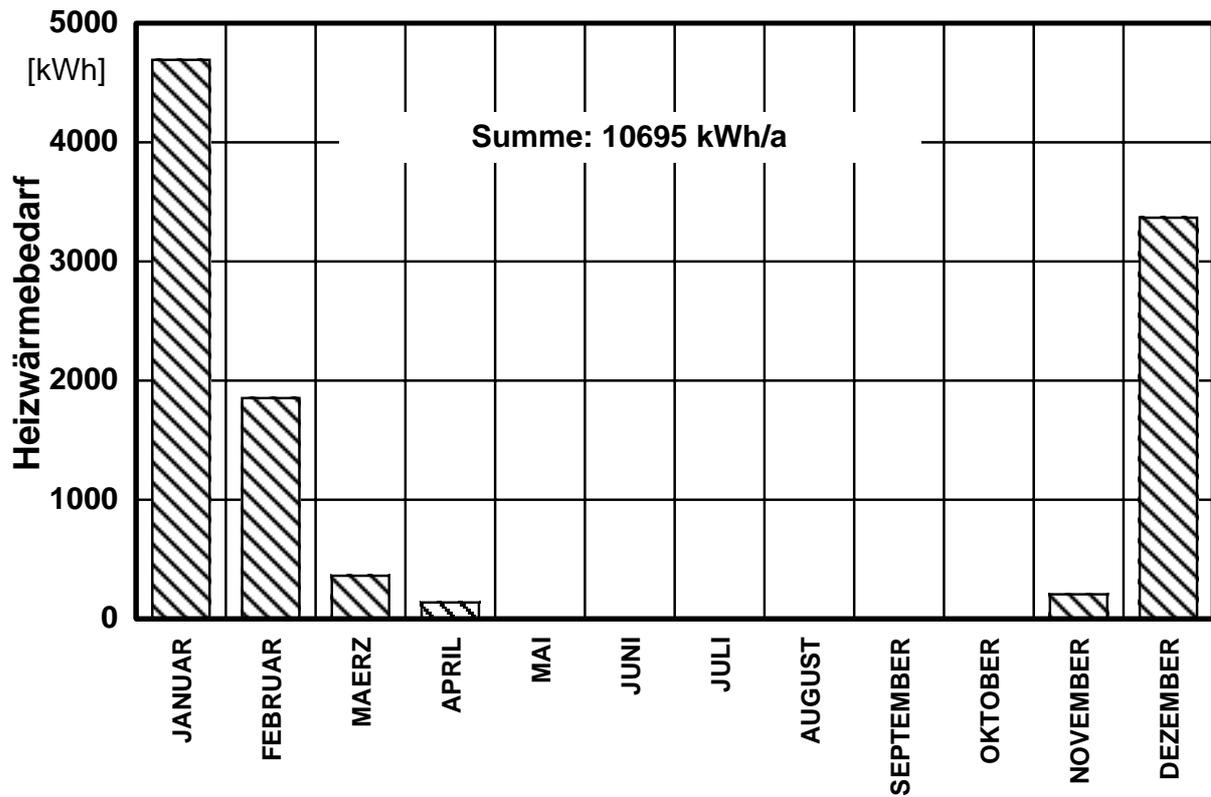
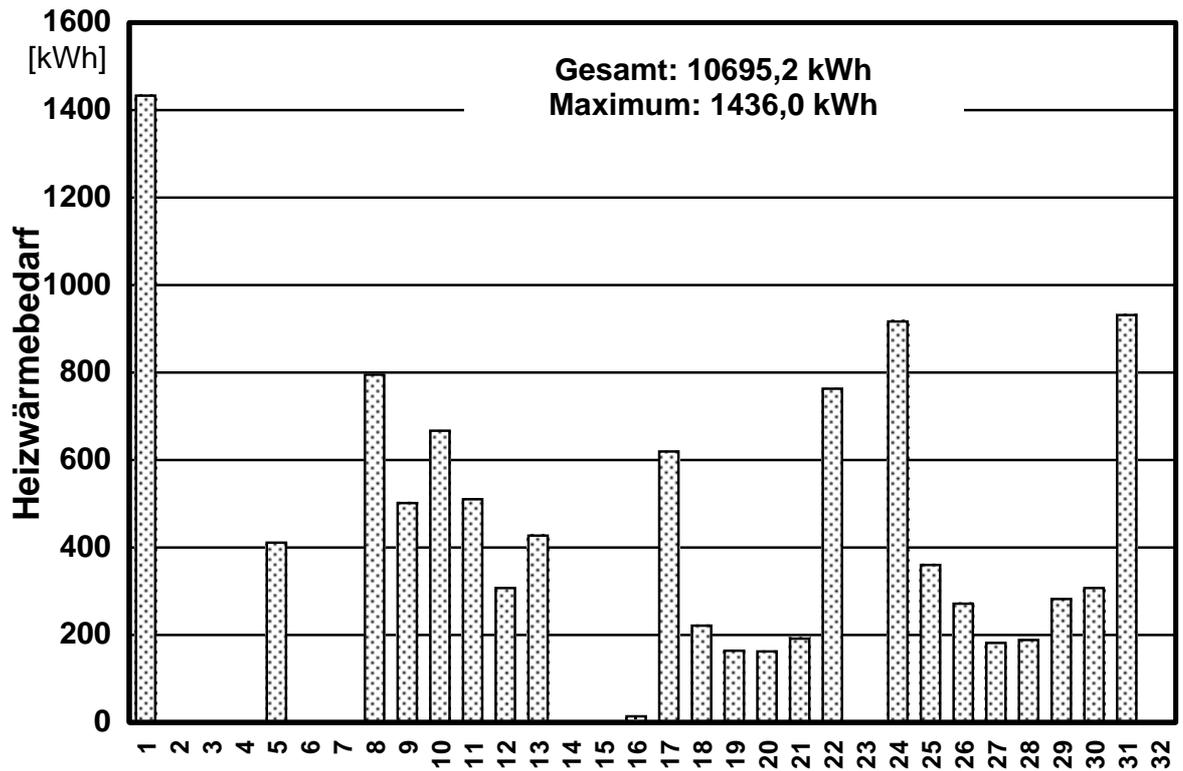


Bild 18: Monats- und Jahreswerte des zur Beheizung bzw. Kühlung erforderlichen Heizwärme- bzw. Kühlkältebedarfes bei idealer Beheizung und Kühlung.

Heizwärmebedarf raumweise



Kühlkältebedarf raumweise, $\vartheta_{Soll}=26\text{ °C}$

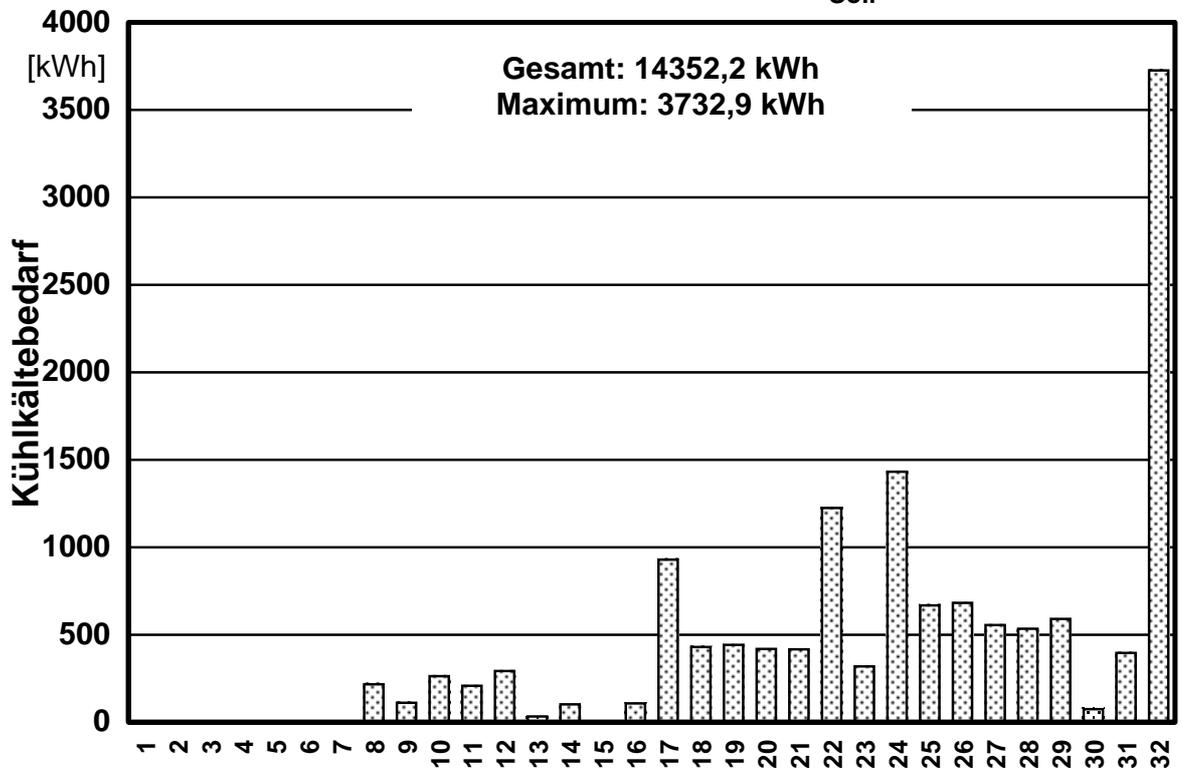


Bild 19: Raumweise Jahreswerte des zur Beheizung bzw. Kühlung erforderlichen Heizwärme- bzw. Kühlkältebedarfes bei idealer Beheizung und Kühlung.

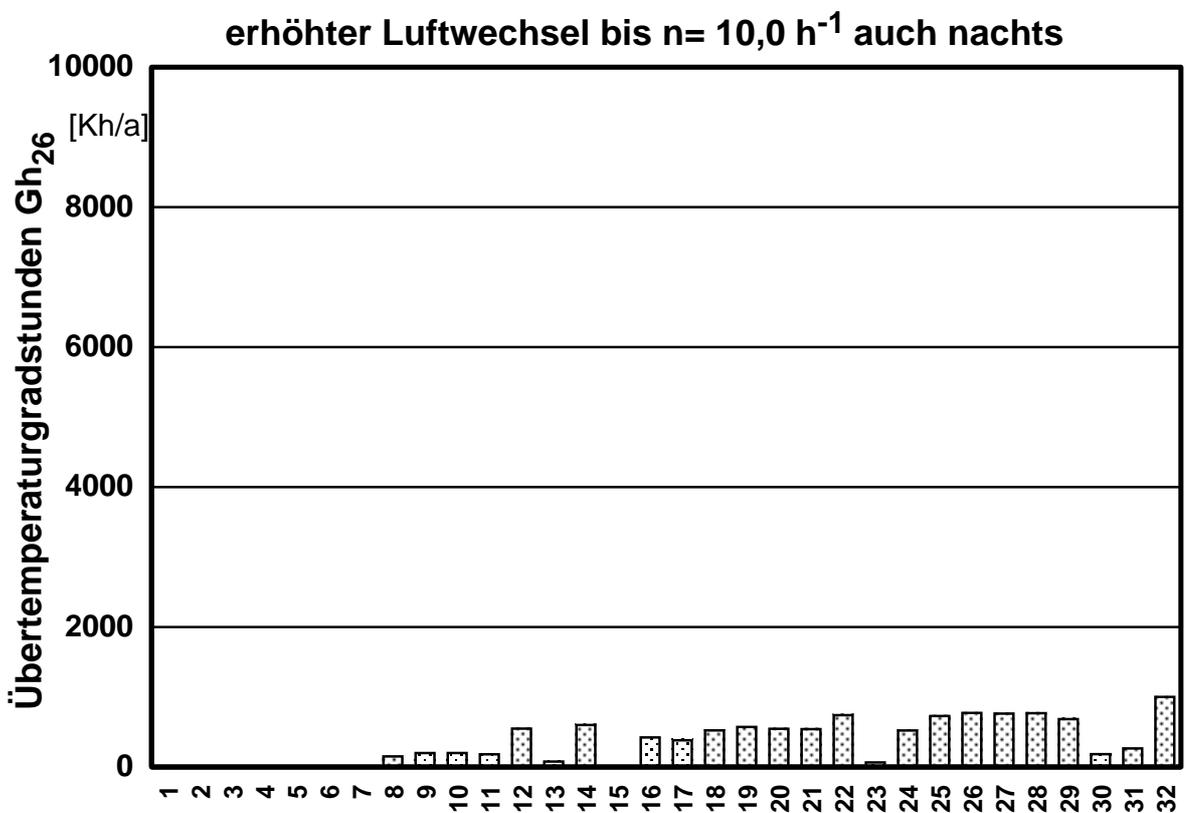
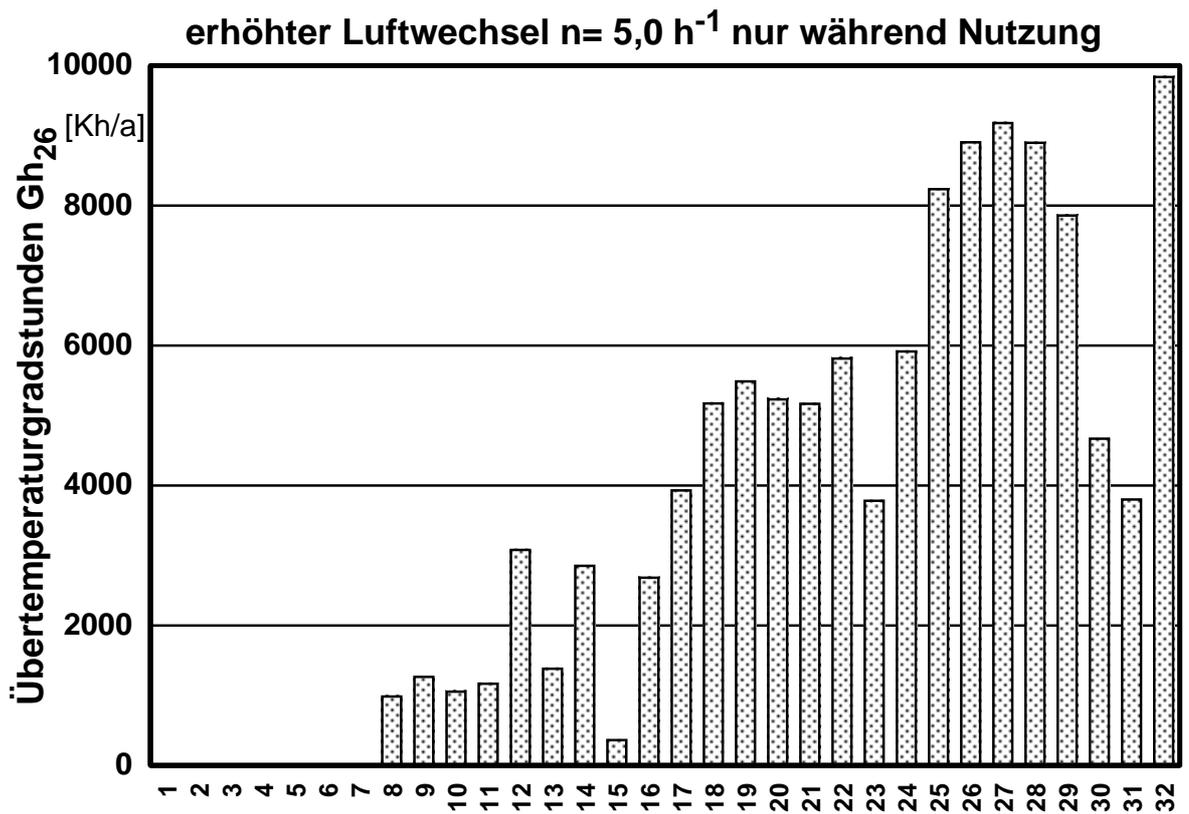


Bild 20: Raumweise vorhandene Übertemperaturgradstunden bei verschiedenen Ansätzen für eine erhöhte Lüftung. Ideale Heizung, keine Kühlung.

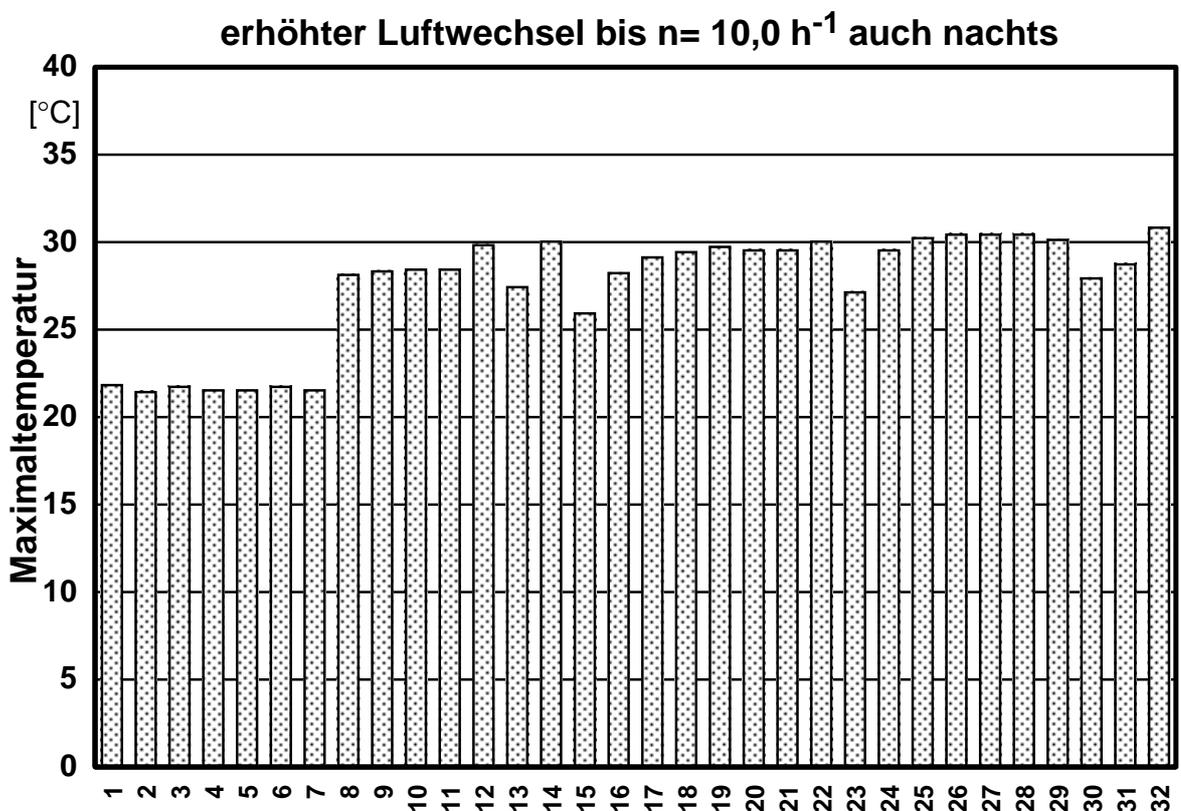
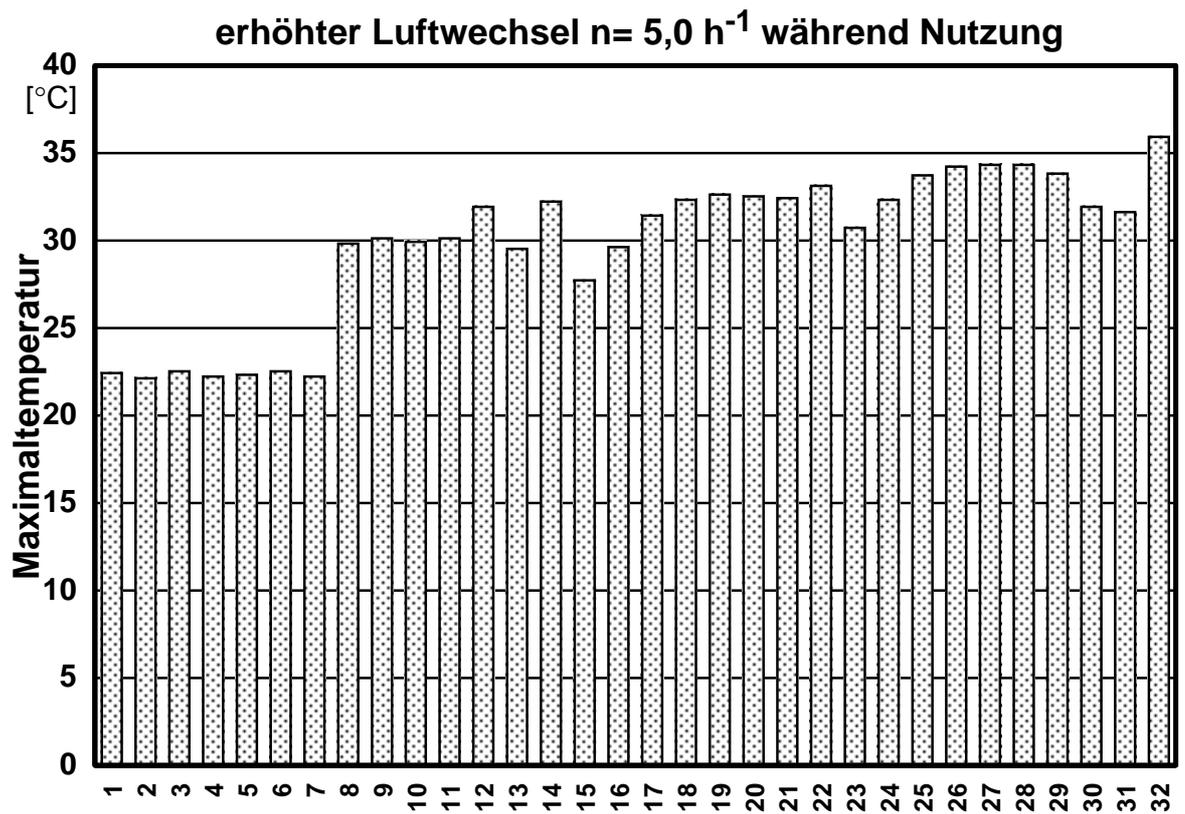


Bild 21: Raumweise vorhandene Maximaltemperaturen bei verschiedenen Ansätzen für eine erhöhte Lüftung. Ideale Heizung, keine Kühlung.

Randbedingungen:	Geometrie:	Gesamtgebäude
	System:	ideale Heizung
	Regelung Heizen:	gemäß Tabelle 2
	Regelung Kühlen:	keine Kühlung
	Wärmegewinne:	gemäß Tabelle 2
	Infiltrationsluftwechsel:	gemäß Tabelle 2
	Maximalluftwechsel:	$n=5,0 (10,0) \text{ h}^{-1}$ bei $\vartheta_{op}>24 (26) \text{ }^\circ\text{C}$ auch nachts
	Sonnenschutz:	$z=0,4$ bei vorh. Direktstrahlung und $\vartheta_{op}>23 \text{ }^\circ\text{C}$
Volumenstrom:	$3300 \text{ m}^3/\text{h}$	

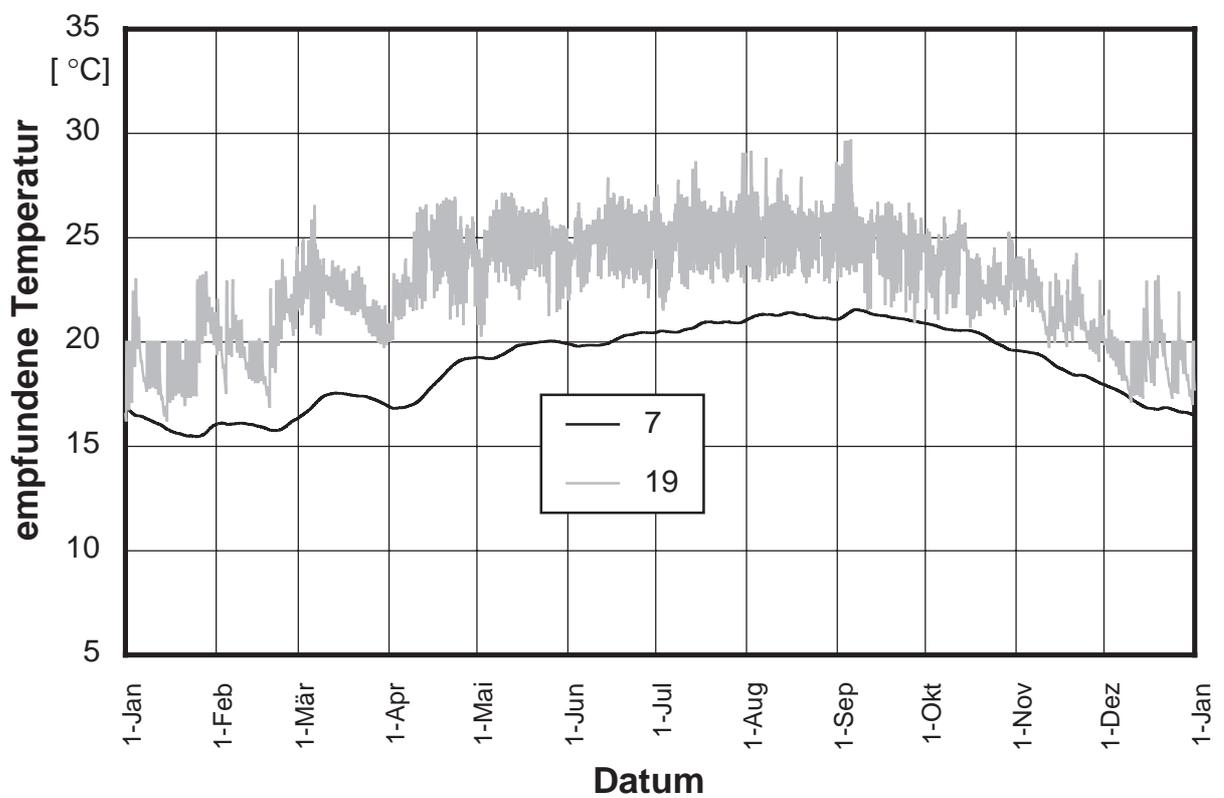
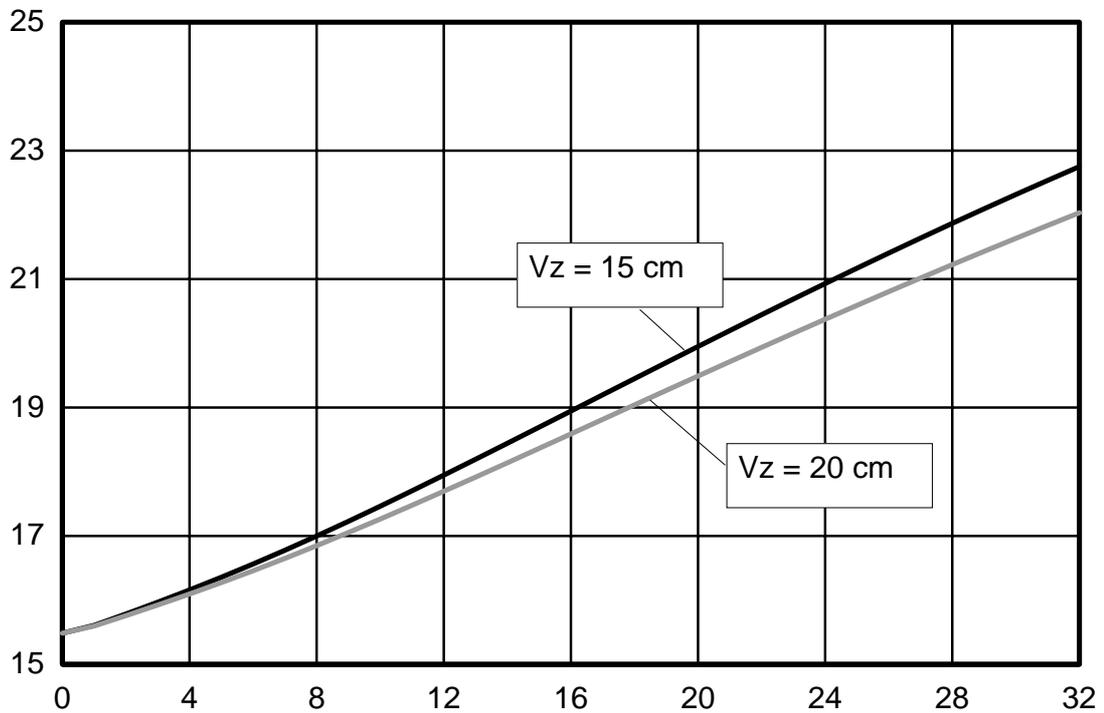


Bild 22: Jahresverläufe der operativen Temperatur im Kellerflur (Raum7) und in einem Zentralbüro (Raum 19).

Aufheizvorgang System Deckenheizung



Aufheizvorgang System Fußbodenheizung

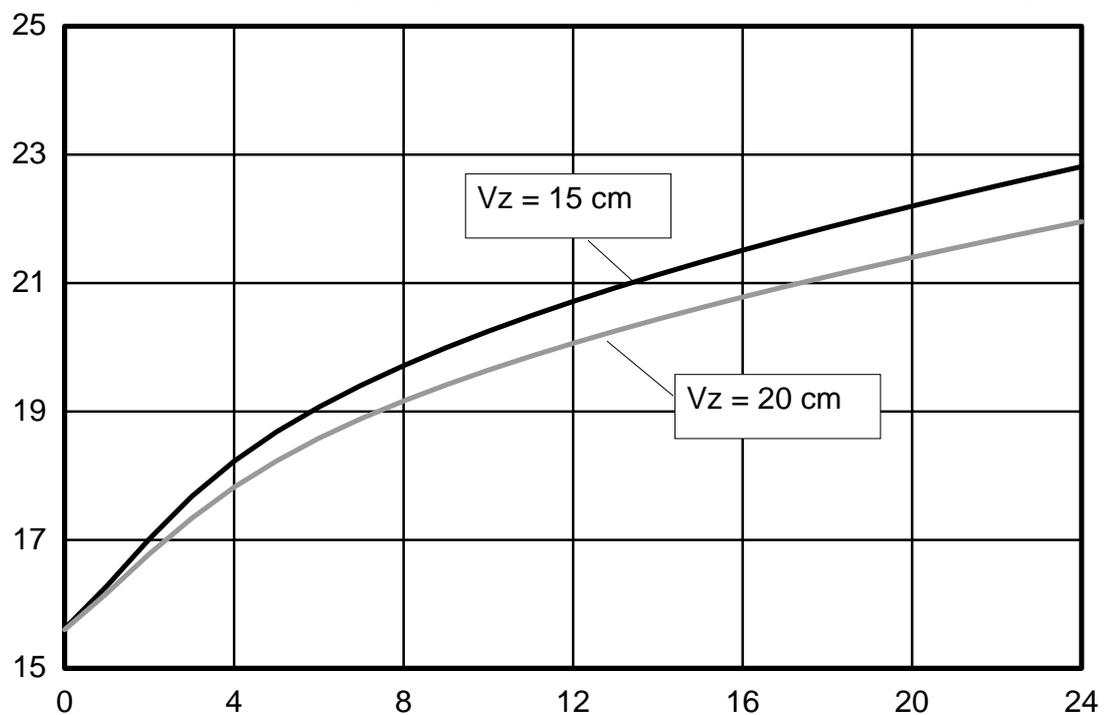


Bild 23: Aufheizverhalten der Systeme Fußboden- und Deckenheizung bei verschiedenen Verlegeabständen V_z .

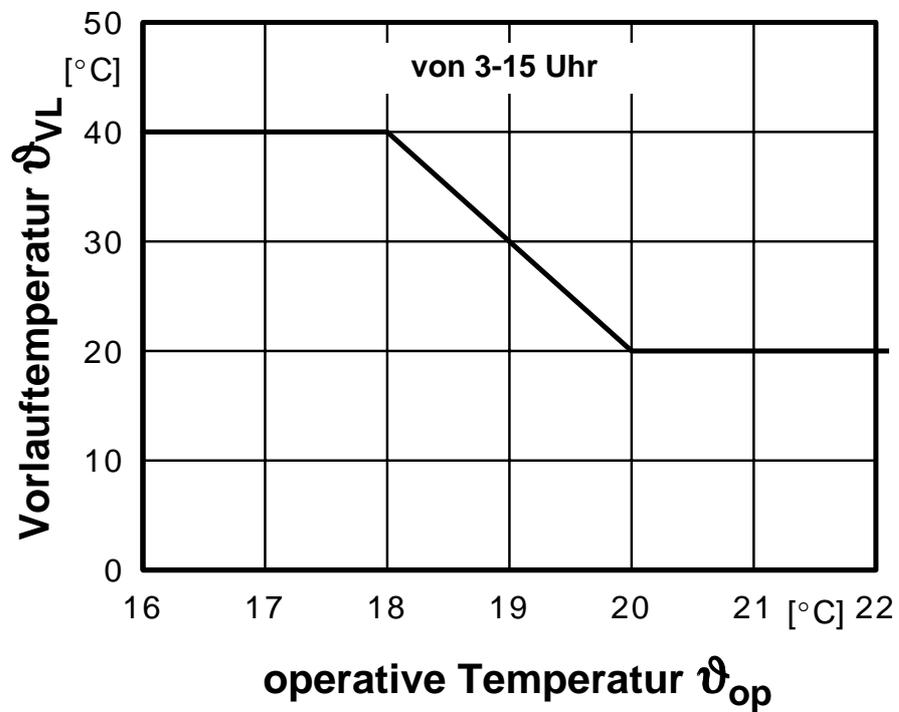
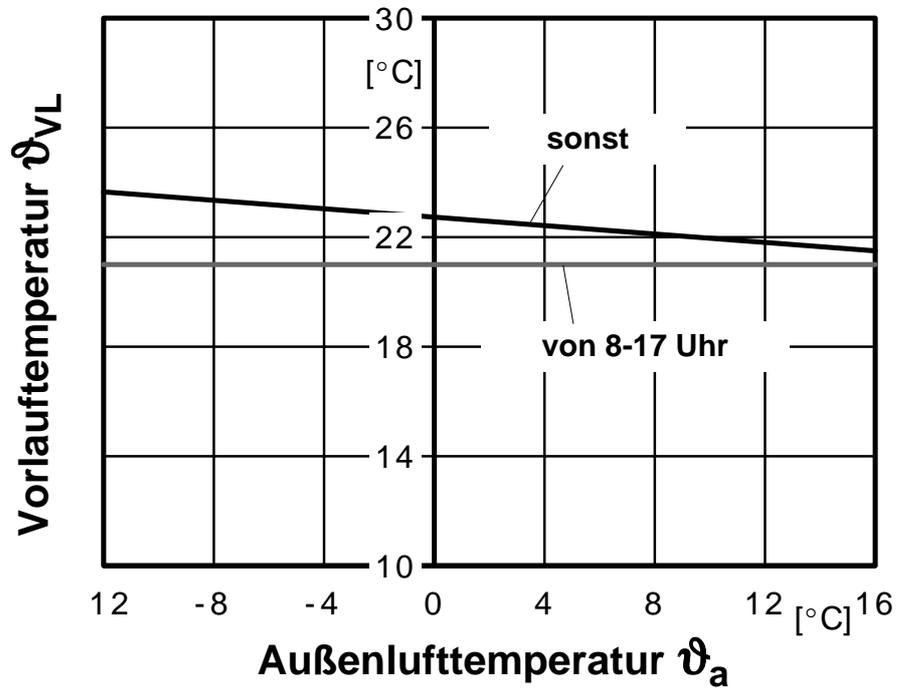


Bild24: Zugrunde gelegte Heizkurven bei Regelstrategie 1 und Regelstrategie 2.

Randbedingungen:	Geometrie:	Zentralbüro
	System:	Deckenheizung, -kühlung
	Massenstrom:	5,5 kg/(m ² h)
	Verlegeabstand:	15 cm
	Regelung Heizen:	Vorlauf Heizkurve, Rücklauf temperaturreg., Zentrale
	Regelung Kühlen:	Zentrale, Vorlauf konstant 18 °C
	Wärmegewinne:	400 W während Nutzung
	Infiltrationsluftwechsel:	n=0,1 h ⁻¹
Maximalluftwechsel:	n=5,0 h ⁻¹ bei $\vartheta_{op}>24$ °C während der Nutzung	
Sonnenschutz:	z=0,4	

Regelstrategie 1

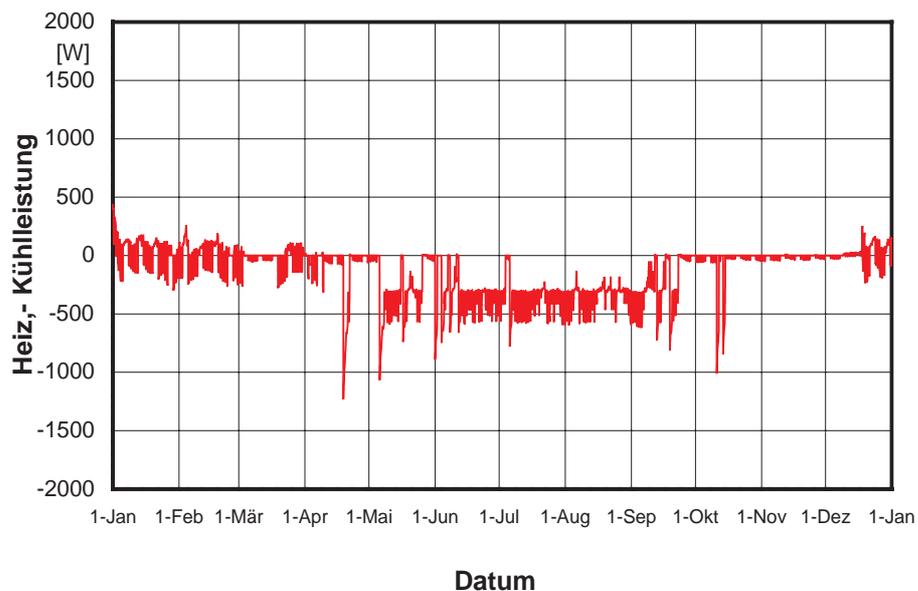
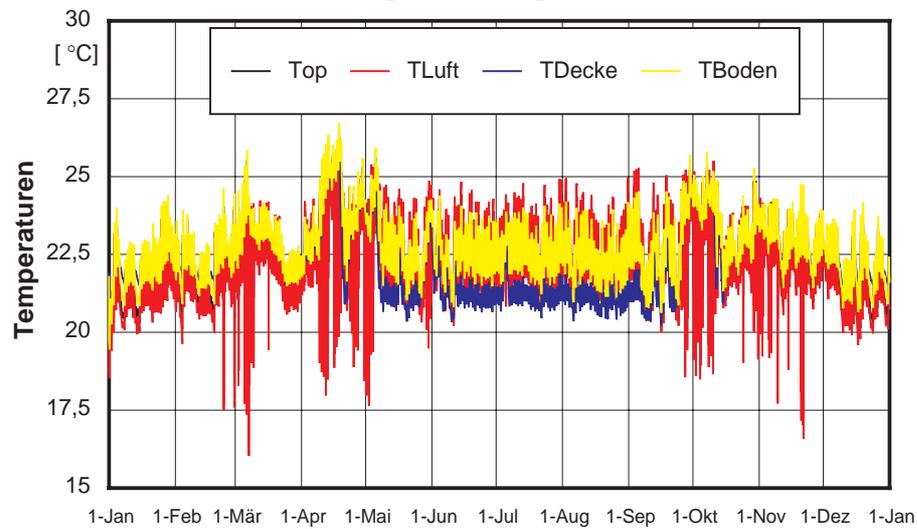


Bild 25: Jahresverläufe von Systemtemperaturen und eingebrachter Heiz- bzw. Kühlleistung bei Regelstrategie 1.

Randbedingungen:	Geometrie:	Zentralbüro
	System:	Deckenheizung, -kühlung
	Massenstrom:	5,5 kg/(m ² h)
	Verlegeabstand:	15 cm
	Regelung Heizen:	Vorlauf Heizkurve, Rücklaufftemperaturreg., Zentrale
	Regelung Kühlen:	Zentrale, Vorlauf konstant 18 °C
	Wärmegewinne:	400 W während Nutzung
	Infiltrationsluftwechsel:	n=0,1 h ⁻¹
Maximalluftwechsel:	n=5,0 h ⁻¹ bei $\vartheta_{op}>24$ °C während der Nutzung	
Sonnenschutz:	z=0,4	

Regelstrategie 1

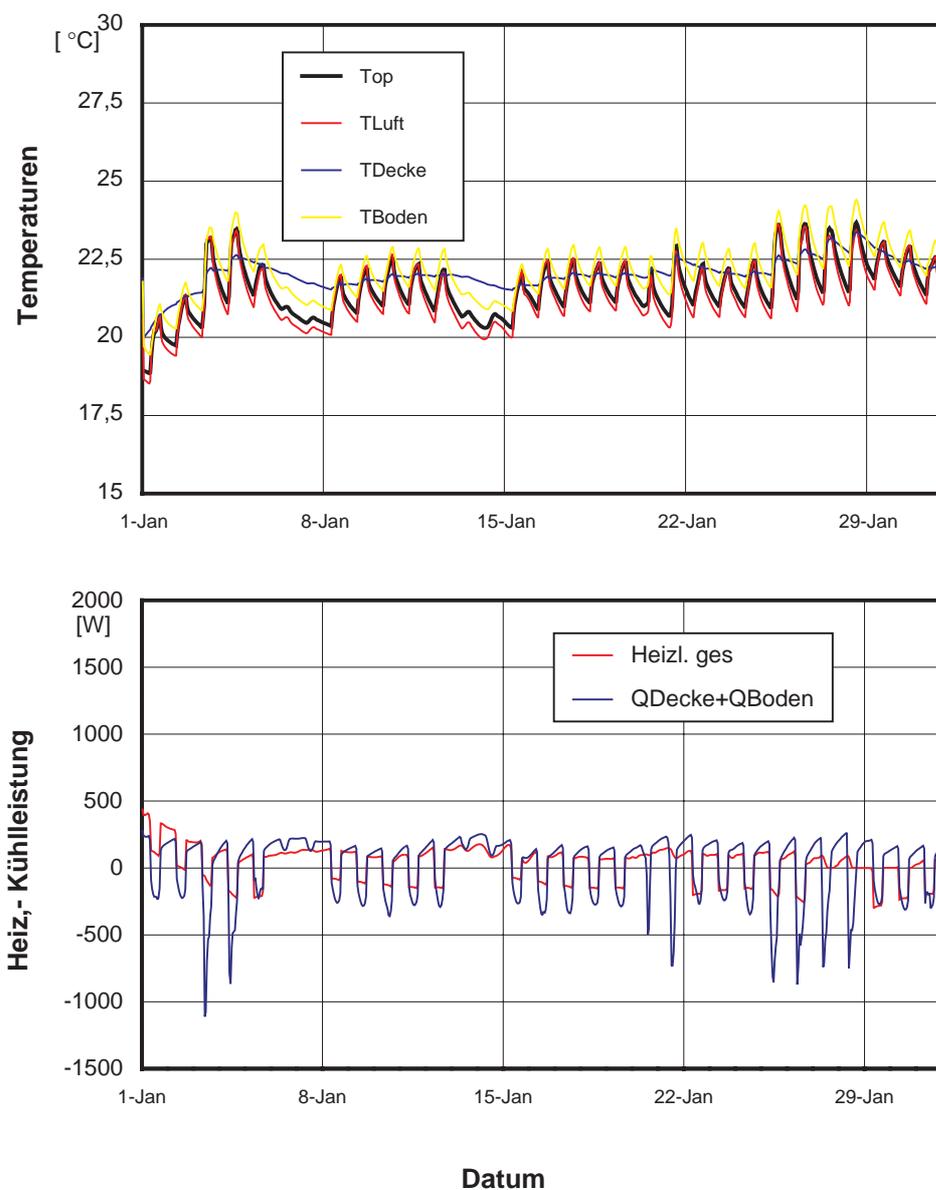


Bild 26: Monatsverläufe von Systemtemperaturen und eingebrachter Heiz- bzw. Kühlleistung bei Regelstrategie 1.

Randbedingungen:	Geometrie:	Zentralbüro
	System:	Deckenheizung, -kühlung
	Massenstrom:	5,5 kg/(m ² h)
	Verlegeabstand:	15 cm
	Regelung Heizen:	Vorlauf Heizkurve 2, Raumtemperaturreg., Zentrale
	Regelung Kühlen:	Zentrale, Vorlauf konstant 18 °C
	Wärmegewinne:	400 W während Nutzung
	Infiltrationsluftwechsel:	n=0,1 h ⁻¹
	Maximalluftwechsel:	n=5,0 h ⁻¹ bei $\vartheta_{op}>24$ °C während der Nutzung
	Sonnenschutz:	z=0,4

Regelstrategie 2

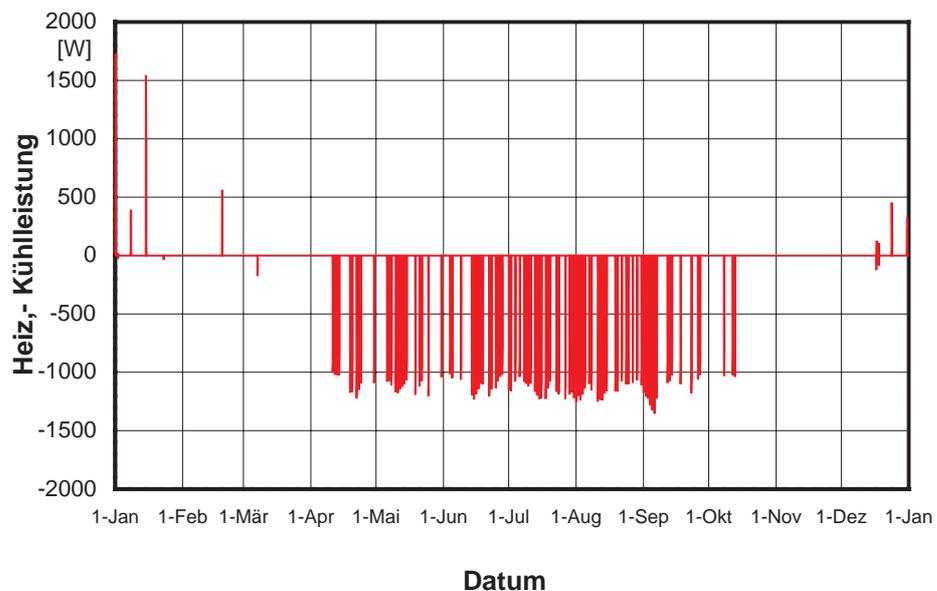
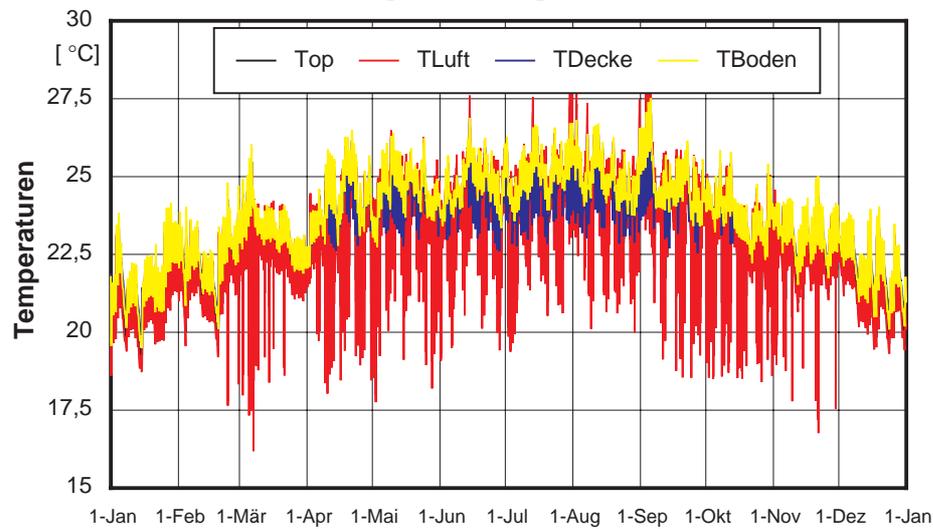


Bild 27: Jahresverläufe von Systemtemperaturen und eingebrachter Heiz- bzw. Kühlleistung bei Regelstrategie 2.

Randbedingungen:	Geometrie:	Zentralbüro
	System:	Deckenheizung, -kühlung
	Massenstrom:	5,5 kg/(m ² h)
	Verlegeabstand:	15 cm
	Regelung Heizen:	Vorlauf Heizkurve 2, Raumtemperaturreg., Zentrale
	Regelung Kühlen:	Zentrale, Vorlauf konstant 18 °C
	Wärmegewinne:	400 W während Nutzung
	Infiltrationsluftwechsel:	n=0,1 h ⁻¹
	Maximalluftwechsel:	n=5,0 h ⁻¹ bei $\vartheta_{op}>24$ °C während der Nutzung
	Sonnenschutz:	z=0,4

Regelstrategie 2

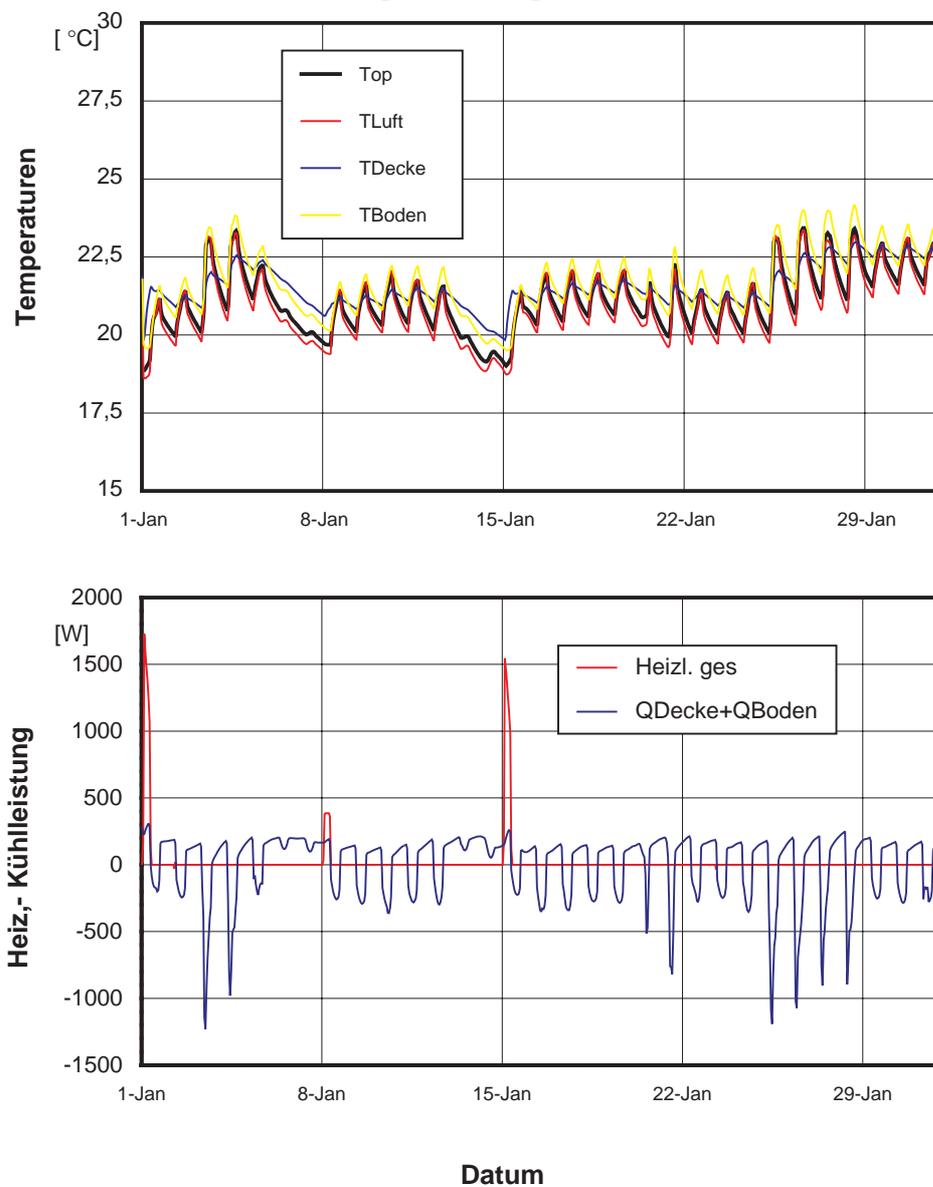


Bild 28: Monatsverläufe von Systemtemperaturen und eingebrachter Heiz- bzw. Kühlleistung bei Regelstrategie 2.

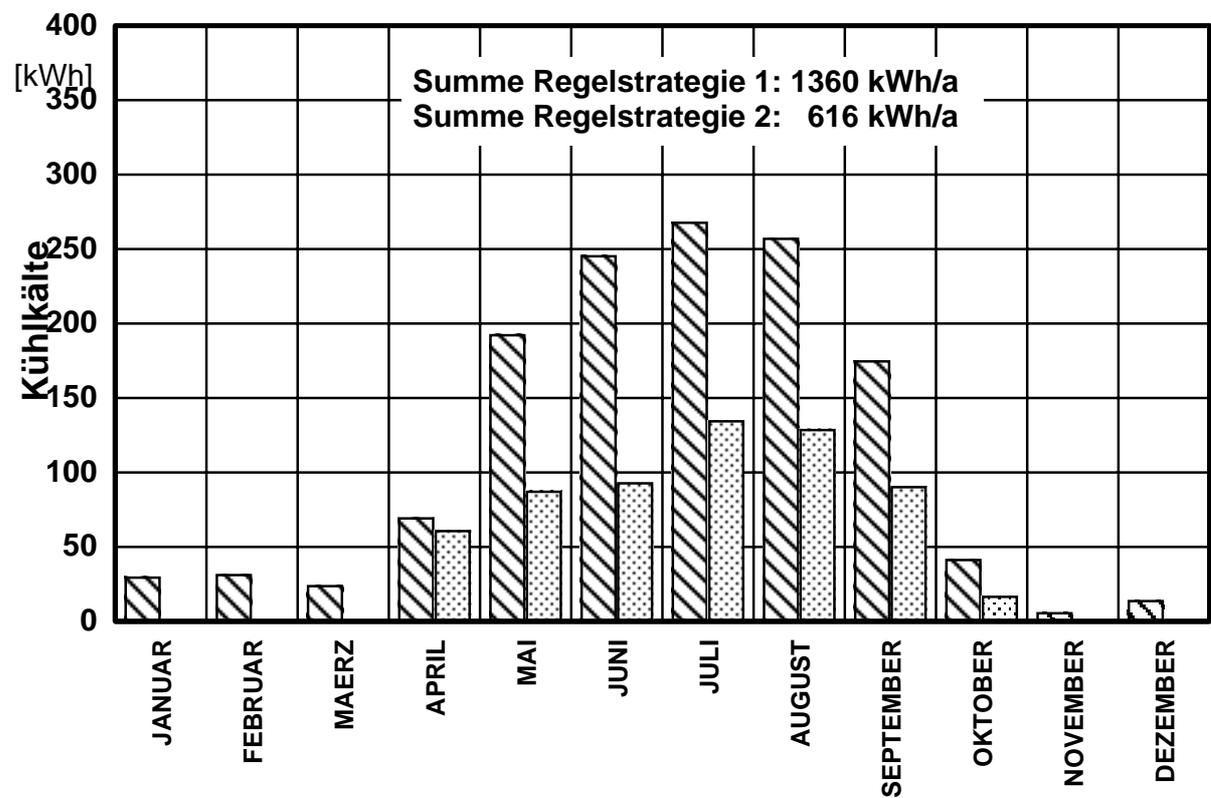
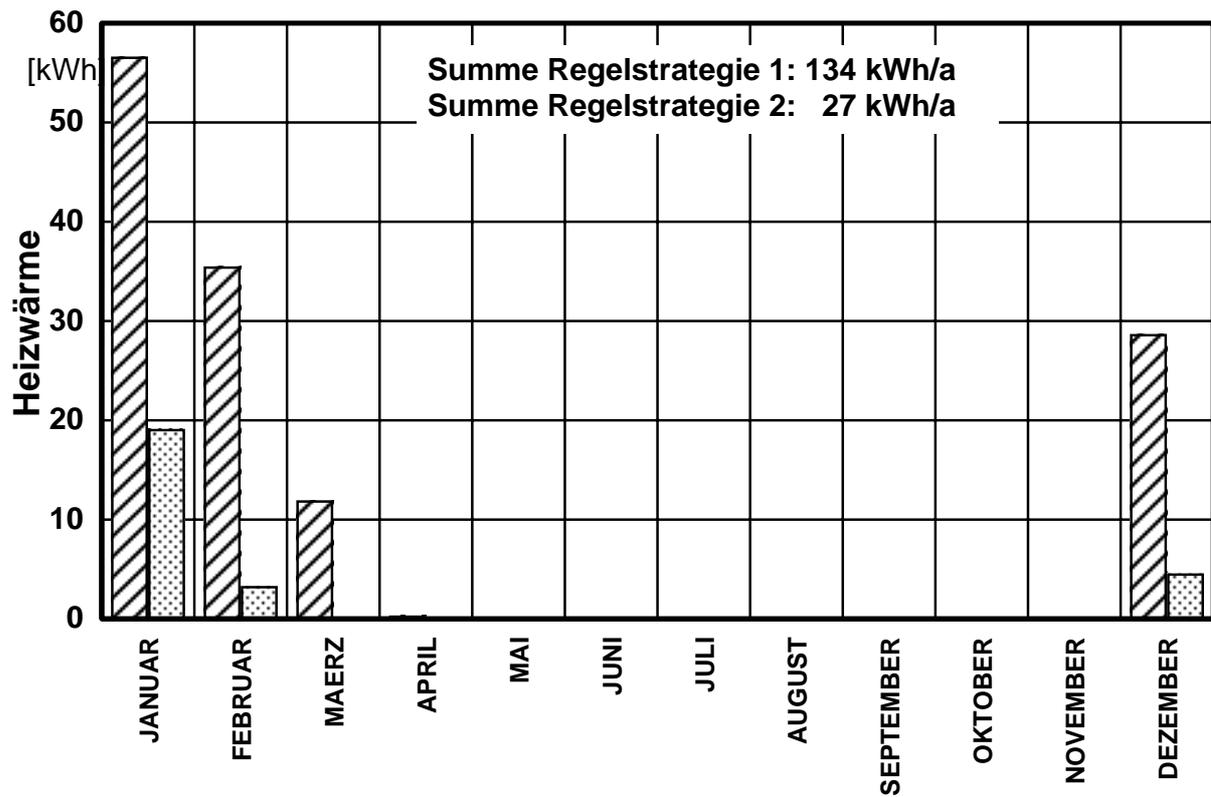


Bild 29: Monats- und Jahreswerte der in den Raum eingebrachten Heizwärme bzw. Kühlkälte bei Regelstrategie 1 und Regelstrategie 2.

Randbedingungen:	Geometrie:	Zentralbüro
	System:	Deckenkühlung
	Massenstrom Kühlung:	5,5 kg/(m ² h)
	Verlegeabstand:	15 cm
	Regelung Heizen:	ideal
	Regelung Kühlen:	Anlagenbetrieb bei $\vartheta_{op} > 25 \text{ °C}$
	Wärmegewinne:	400 W während Nutzung
	Infiltrationsluftwechsel:	n=0,1 h ⁻¹
Maximalluftwechsel:	n=5,0 h ⁻¹ bei $\vartheta_{op} > 24 \text{ °C}$ während der Nutzung	
Sonnenschutz:	z=0,4	

Zentralbüro mit Bodenplattenkühler

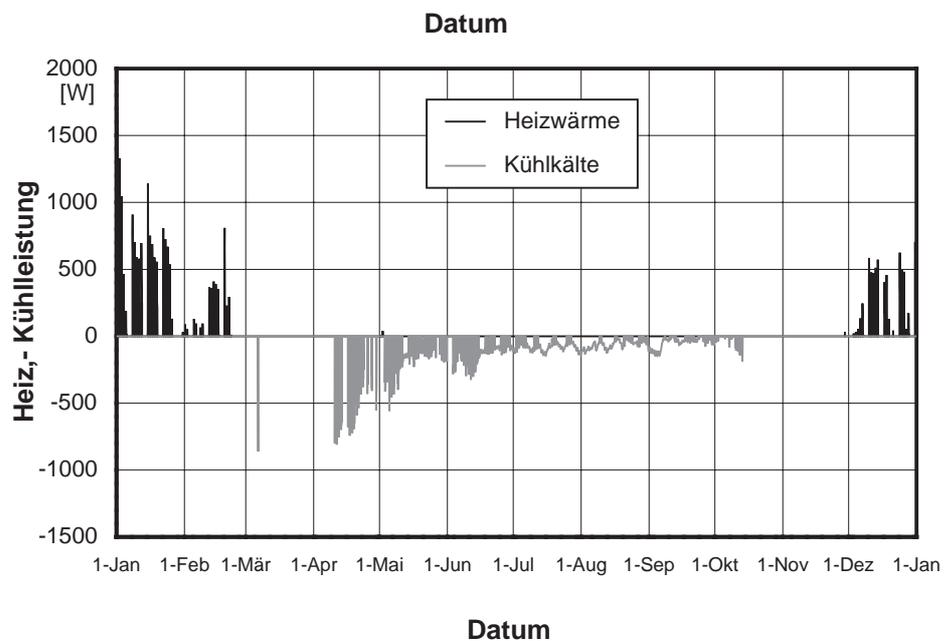
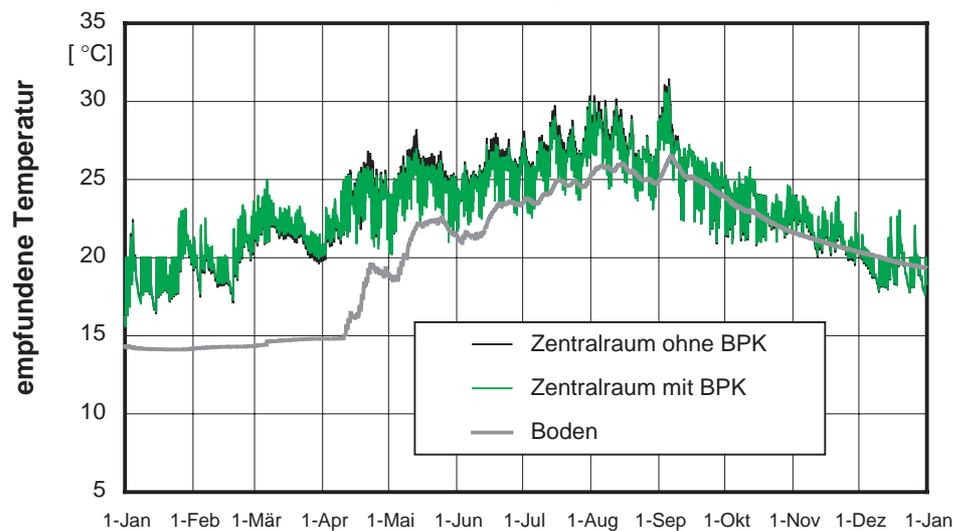


Bild 30: Jahresverläufe von Systemtemperaturen und eingebrachter Heiz- bzw. Kühlleistung System Bodenplattenkühler Variante 1.

Randbedingungen:	Geometrie:	Zentralbüro
	System:	Deckenkühlung
	Massenstrom Kühlung:	5,5 kg/(m ² h)
	Verlegeabstand:	15 cm
	Regelung Heizen:	ideal
	Regelung Kühlen:	Anlagenbetrieb bei $\vartheta_{op} > 25 \text{ °C}$
	Wärmegewinne:	400 W während Nutzung
	Infiltrationsluftwechsel:	n=0,1 h ⁻¹
Maximalluftwechsel:	n=5,0 h ⁻¹ bei $\vartheta_{op} > 24 \text{ °C}$ während der Nutzung	
Sonnenschutz:	z=0,4	

Zentralbüro mit Bodenplattenkühler

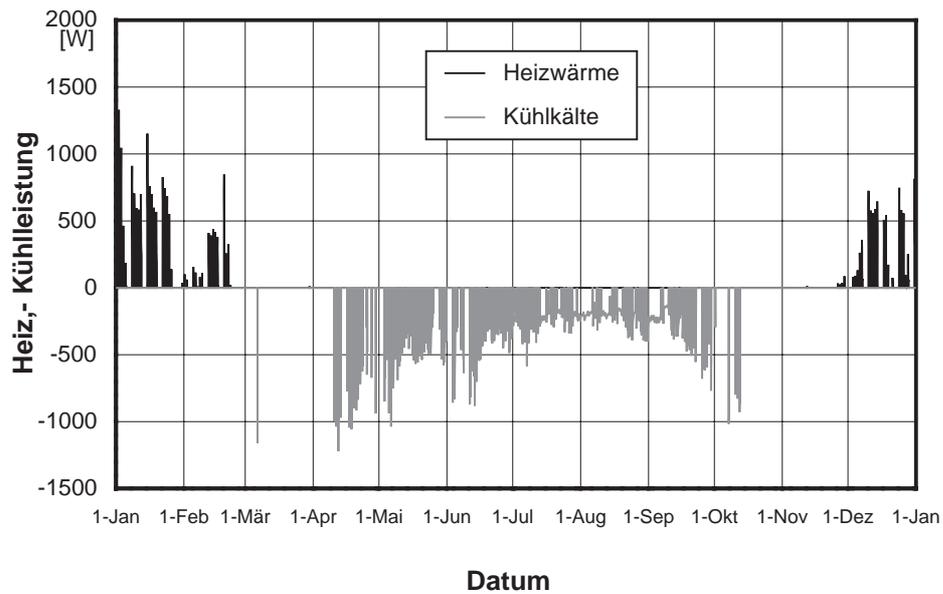
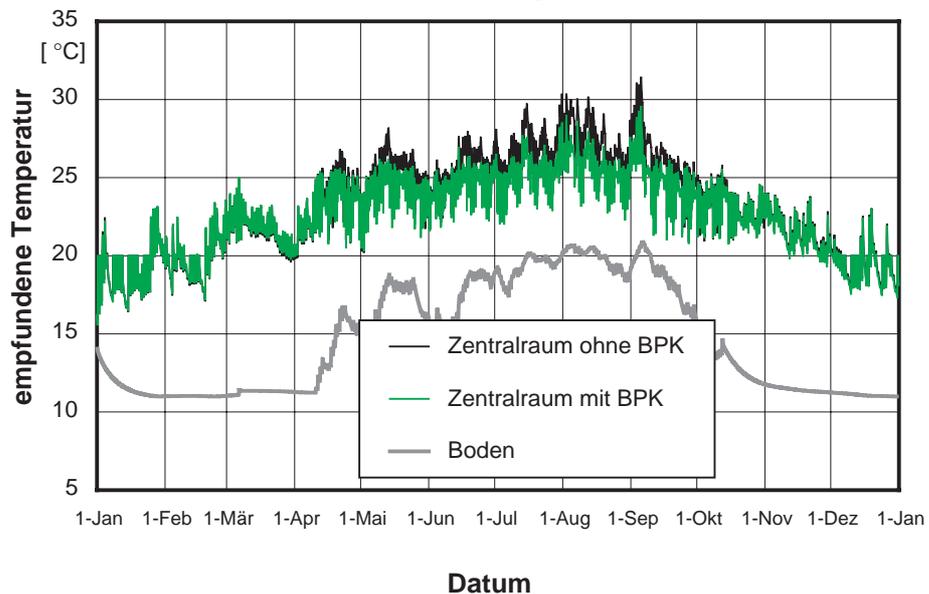


Bild 31: Jahresverläufe von Systemtemperaturen und eingebrachter Heiz- bzw. Kühlleistung System Bodenplattenkühler Variante 2.