

Wirtschaftliche Kombination von Anlagekomponenten für die integrierte Energieversorgung von Gebäuden

Von L. Rouvel¹⁾

Einleitung

Hoher Anteil verglaster Flächen an der Außenfassade, meist große Innenzonen, hohe Beleuchtungsstärke sowie die starke Belegung mit Personen und maschinellen Anlagen, nicht zuletzt auch die zunehmende Luftverschmutzung und Lärmbelastigung von außen machen bei großen Büro- und Geschäftsbauten eine Klimatisierung unumgänglich.

Die Klimatisierungssysteme sollten aus wirtschaftlichen Gründen und wegen der thermischen Umweltbelastung mit einem möglichst geringen Energieaufwand auskommen. Hierzu muß man die mögliche Wärme- und Kälterückgewinnung ausnutzen und die klimatechnischen Forderungen bereits bei der Gebäudekonzipierung weitgehend berücksichtigen.

Voraussetzung hierfür ist eine möglichst einwandfreie Bestimmung des Wärme- und Kältebedarfs unter Einschluß aller darauf wirkenden Faktoren, vor allem unter Berücksichtigung der dynamischen Vorgänge. Erst wenn der Zeitgang des Wärme- und Kältebedarfs und des allgemeinen Energiebedarfs – Beleuchtung usw. – während der Auslegungstage im Winter und Sommer sowie während eines Normaljahres bekannt ist, läßt sich ein wirtschaftliches Konzept für eine integrierte Energieversorgung erarbeiten.

Am Beispiel eines modernen Bürogebäudes sollen die Möglichkeiten bei allelektrischer Versorgung aufgezeigt werden.

Ausgangsdaten

Das Bürogebäude hat etwa quadratischen Grundriß. Der Fensteranteil an der Außenfassade beträgt 55 %. Zum Sonnenschutz ist die Außenscheibe der Doppelverglasung eingefärbt. Die Beleuchtungsstärke beträgt 1 000 lx in den Büroräumen. Um die Kühllast geringer zu halten, sind Absaugeleuchten eingebaut. Die Personenbelegung wird zu 9 m² je Person angenommen. Als minimaler Frischluftbedarf wird ein Wert von rund 100 m³ je Stunde und Person gefordert. Die Raumlufttemperatur soll 22 °C betragen und im Sommer entsprechend DIN 1946 der Außentemperatur proportional angehoben werden. Die relative Luftfeuchtigkeit wird zu 45 % festgelegt.

Konzeption der Wärmerückgewinnung

Um bei allelektrischer Versorgung eine wirtschaftliche Klimatisierung durchführen zu können, müssen folgende Anlagen vorgesehen werden:

- Regenerativwärmetauscher (RWT) zur Wärmerückgewinnung (WRG) aus der Fortluft zur Vorwärmung und Vorbefeuchtung der Zuluft
- als Wärmepumpe einsetzbare Kältemaschine.

Oft wird nur eine der beiden Anlagen eingebaut. Wie in [1] gezeigt wurde, hat der Regenerativwärmetauscher den Vorteil eines hohen Wirkungsgrades, wodurch sich der Nennwärmebedarf der Klimaanlage stark verringert. Dagegen läßt sich der Jahreswärmebedarf nicht so stark reduzieren, da zur Einhaltung der gewünschten Raumluftfeuchte die mögliche Wärmerückgewinnung nur zum Teil ausgenutzt werden kann. In bezug auf den Jahreswärmebedarf ist hier die Wärmepumpe günstiger, da sie die gewonnene Wärme nicht nur an die Zuluft, sondern auch an das Heizwassernetz abgeben kann und somit eine

wesentlich höhere Benutzungsdauer ermöglicht. Dagegen steht der Nachteil, daß für die Auslegung im Winter weniger Wärme aus der Abluft entzogen werden kann, da die als Wärmepumpe eingesetzte Kältemaschine die Fortluft nur auf etwa 8 bis 10 °C und nicht unter 0 °C abkühlen kann.

Es erscheint daher sinnvoll, die Vorteile beider Anlagen zu kombinieren, um einen hohen Rückgewinnungsgrad sowohl an den Auslegungstagen im Winter wie auch für das Normaljahr zu erhalten.

Für eine Vierleiter-Induktions-Klimaanlage sind die Zustandsänderungen der durch die Klimaanlage und durch den klimatisierten Raum geführten Luft für den Auslegungstag im Winter in Bild 1 im *h, x*-Diagramm für feuchte Luft dargestellt.

Punkt 1: Außenluftzustand,

Punkt 2: Zuluft nach Wärmeaufnahme aus dem Regenerativwärmetauscher,

Punkt 3: Zuluft über Wärmepumpe auf Taupunktenthalpie abgekühlt,

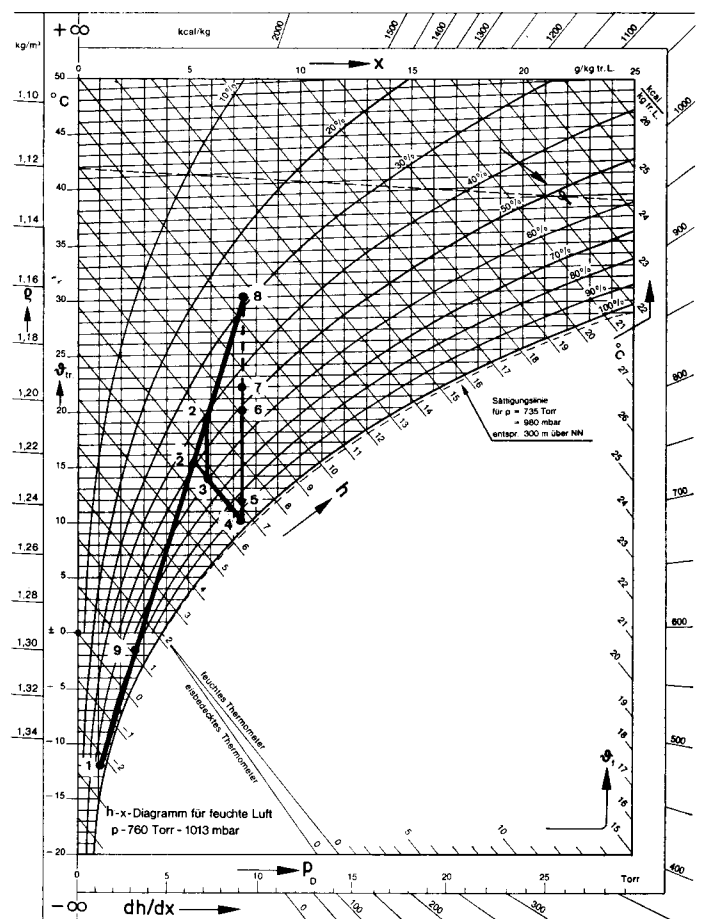


Bild 1: Zustandsänderungen der Luft im *h, x*-Diagramm, Auslegungstag Winter

Fig. 1: Changes in the state of the air in the *h, x* diagram; winter design day

Fig. 1: Modification d'état de l'air dans le diagramme *h, x*, jour de calcul en hiver

¹⁾ Dr.-Ing. Lothar Rouvel, Institut für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik der Technischen Universität München

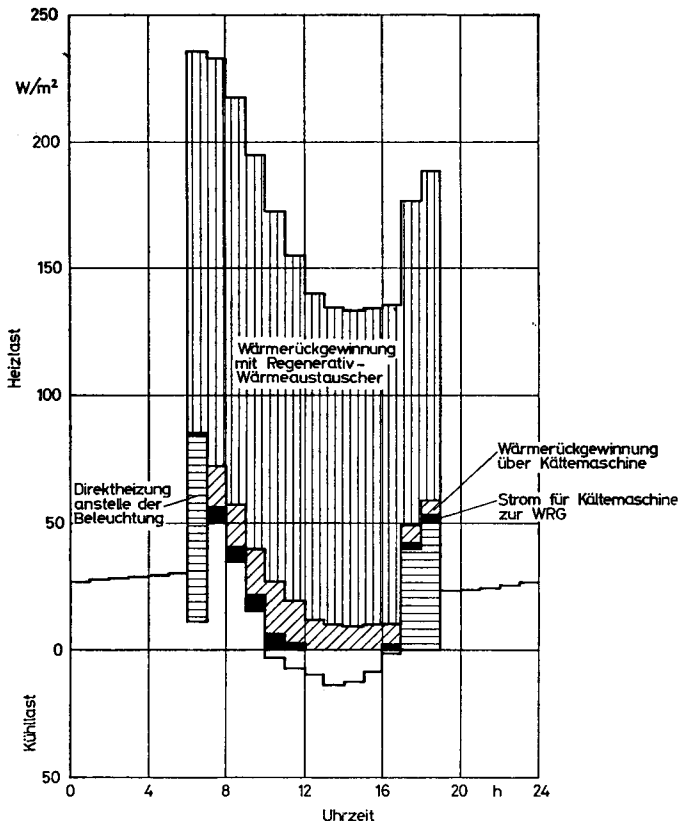


Bild 2: Heiz- und Kühllast der Klimaanlage für Auslegungstag Winter je Quadratmeter klimatisierte Bürofläche

Fig. 2: Heating and comfort-cooling loads of the air-conditioning system on the winter design day per square metre of air-conditioned floor area

Fig. 2: Charge de chauffage et de réfrigération de l'installation de climatisation pour le jour de calcul en hiver, par mètre carré de superficie de bureau climatisée

Punkt 4: Zuluft nach Befeuchtung,

Punkt 5: Zuluft nach Aufwärmen durch mechanische Arbeit der Gebläse,

Punkt 6: Mischluftzustand von Primärluft und induzierter Sekundärluft im Induktionsgerät,

Punkt 7: Raumluftzustand,

Punkt 8: Abluftzustand nach Aufnahme der Beleuchtungswärme in den Absaugerleuchten,

Punkt 9: Fortluftzustand nach dem Regenerativwärmetauscher.

Bei einem Wirkungsgrad von 75% erwärmt der Regenerativwärmetauscher die Zuluft über die Taupunktenthalpie (Punkt 2) hinaus, da die Abluft infolge der Beleuchtungswärme eine Temperatur von etwa 30 °C annimmt. Zum Abkühlen der Zuluft wird die Kältemaschine eingesetzt, die zugleich als Wärmepumpe dem Heizwassernetz entsprechende Wärmemengen zuführt.

Wie Bild 2 zeigt, tritt bei der Vierleiter-Induktionsanlage selbst am Winterauslegungstag gleichzeitig Wärme- und Kältebedarf auf. Die Kältemaschine läßt sich dabei auch als Wärmepumpe einsetzen, indem die Abwärme aus dem Kühlbetrieb je nach Bedarf in das Heizwassernetz gegeben wird, wodurch eine Wärmeverschiebung zwischen den einzelnen Fassaden des Gebäudes zustande kommt.

Berechnung des Wärme- und Kältebedarfs

Das Programm zur Berechnung der dynamischen Heiz- und Kühllasten

Eine wichtige Aufgabe von Raumumschließungsflächen ist der Schutz vor unerwünschten Einflüssen des Außenklimas. Ent-

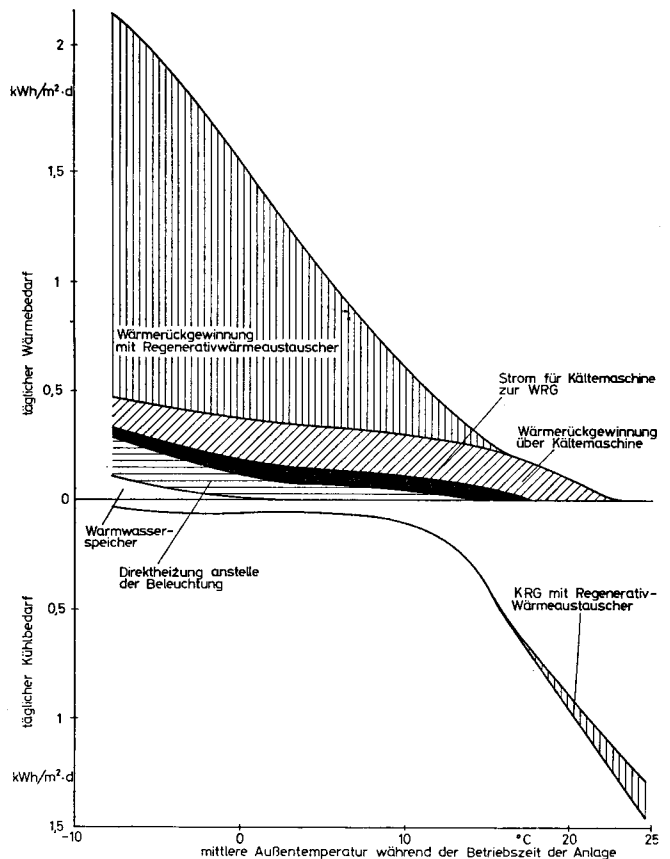


Bild 3: Täglicher Wärme- und Kältebedarf der Klimaanlage während ihrer Betriebszeit je Quadratmeter klimatisierte Bürofläche

Fig. 3: Daily energy requirement for heating and comfort-cooling during the operation of the air-conditioning system per square metre of air-conditioned floor area

Fig. 3: Besoins journaliers de chaleur et de froid de l'installation de climatisation pendant ses heures de marche, par mètre carré de superficie de bureau climatisée

scheidend für das Raumklima ist der wärmetechnische Aufbau der Außen- und Innenwände sowie des Fußbodens und der Decke, wobei nicht nur der Wärmedämmwert, wie bisher meist angesetzt, sondern auch die Speicherefähigkeit dieser Wände das Raumklima beeinflusst.

Wegen der Speicherefähigkeit der Wände und der zeitlichen Schwankungen der außen- und innenklimatischen Einflüsse auf die Raumumschließungsflächen muß die Heiz- und Kühllastberechnung die instationären Vorgänge berücksichtigen. Daher führen stationäre Berechnungsmethoden zu keinem befriedigenden Ergebnis.

Das wärmetechnische Verhalten von Wänden wird durch die Wärmeleitgleichung beschrieben, eine partielle Differentialgleichung, die allgemein nicht lösbar ist.

Die allgemein bekannten Lösungsansätze lassen daher nur vereinfachte Probleme bezüglich der Randbedingungen oder des Wandaufbaus zu. In [2] ist ein Rechenverfahren hergeleitet, das auch für mehrschichtige Wände die Berücksichtigung der Speicherefähigkeit und des Wärmedurchgangs erlaubt. Dieses analytische Verfahren ist in ein EDV-Programm eingearbeitet, das die Berechnung der Heiz- und Kühllast sowohl für die Auslegung im Winter und Sommer, als auch für ein Normaljahr ermöglicht.

Mit diesem EDV-Programm zur Berechnung der dynamischen Heiz- und Kühllasten werden folgende Werte ermittelt:

1. Maximum der Heiz- und Kühlleistung in den nach verschiedenen Himmelsrichtungen gelegenen Räumen;
2. Maximum der Gesamtheiz- und -kühlleistung des Gebäudes;
3. Maximum des täglichen Wärmebedarfs zur Auslegung des Wärmespeichers bei allelektrischer Versorgung;

4. jährlicher Wärmebedarf des Gebäudes zur Ermittlung des Jahresstromverbrauchs für Heizung während der HT- und NT-Zeit, getrennt nach
 - Direktheizung während der Betriebszeit der Klimaanlage, wenn die Beleuchtung reduziert oder ausgeschaltet ist,
 - Stromverbrauch der Kältemaschine im Wärmepumpenbetrieb,
 - Stromverbrauch der Warmwasserspeicher,
 - Wärmebedarf nachts und am Wochenende;

5. jährlicher Kältebedarf zur Ermittlung des Jahresstromverbrauchs für Kühlung.

Für die Auffindung der Maximalwerte des Heizbedarfs werden mehrere Wintertage, nämlich klare und bedeckte Werktag und der erste Arbeitstag nach einem Wochenende untersucht. Meist treten die Maxima für verschiedene Räume und für das Gesamtgebäude am Anfang der Betriebszeit der Klimaanlage vor Beginn der Bürozeit auf.

Zur Ermittlung des maximalen Kühlbedarfs werden ausschließlich klare Tage der Monate April bis September herangezogen. Hier ergeben sich in der Regel die Einzelmaxima für die Räume und das Gebäude zu verschiedenen Zeiten und Tagen. Das Gesamtmaximum ist daher wesentlich kleiner als die Summe der Einzelmaxima.

Ergebnisse der Heiz- und Kühllastberechnung

Für den Auslegungstag im Winter sind in Bild 2 die wesentlichen Aussagen zur Deckung des Wärmebedarfs bei einer Vierleiter-Induktions-Klimaanlage dargestellt, nämlich für

- die Konditionierung der Primärluft,
- die Erwärmung des Sekundärwarmwassersystems und
- die Kühlung des Sekundärkühlwassersystems.

In Bild 2 treten neben den bereits besprochenen Energiekreisläufen durch Wärmerückgewinnung mit Regenerativwärmetauscher und Einsatz der Kältemaschine als Wärmepumpe noch folgende Wärmeerzeugungsvarianten:

- Direktheizung an Stelle der Beleuchtung und
- Entspeichern eines Warmwasserspeichers.

Nach der Heiz- und Kühllastberechnung kann bei maximaler Heizbelastung am „Winterauslegungstag“ eine Direktheizung morgens und abends in dem Rahmen der elektrischen Leistung durchgeführt werden, den die Beleuchtung bestimmt. Zur Heizwärmespeicherung reicht ein Warmwasserspeicher von nur knapp 2 l Inhalt je Quadratmeter klimatisierte Bürofläche aus, der sich ohne bauliche Veränderung in der Klimatisierungszentrale unterbringen läßt.

Da die Kältemaschine im Kühlbetrieb eine Leistungsziffer von etwa 3,0 und daher als Wärmepumpe von etwa 4,0 hat, werden für die Kompressorarbeit zur Durchführung des Wärmepumpenprozesses nur 25 % der in das Sekundärwarmwassernetz eingefleiteten Energiemenge benötigt. Die hiermit gewonnene Wärme kostet bei einem Tagesstromarbeitspreis zwischen 6 und 8 Pf/kWh zwischen 17 und 23 DM/Gcal (4,0 und 5,50 DM/GJ). Da diese Wärme mit nur rund einem Drittel der Arbeitskosten bei Speicherheizung erzeugt werden kann, wird man bei Klimatisierung im Rahmen der allelektrischen Versorgung diesem Wärmepumpenprozeß eine höhere Einsatzpriorität als dem Wärmeentzug aus dem Warmwasserspeicher geben.

Wenn zeitgleich ein Heiz- und Kühlbedarf auftritt, kann die zur Kühlung benötigte Kältemaschine Wärme aus dem Kühlsystem in das Heizsystem verschieben. Die hierzu erforderliche Kompressorarbeit ist nach dem Verursacherprinzip nicht der Heizung, sondern der Kühlung anzulasten. Diesem Wärmepumpenprozeß ist deshalb die erste Priorität zuzuordnen, da die Wärmedarbietung an das Heiznetz kostenlos ist.

Der Zusammenhang zwischen der Außentemperatur und dem täglichen Wärme- und Kühlbedarf wird aus Bild 3 deutlich. Die

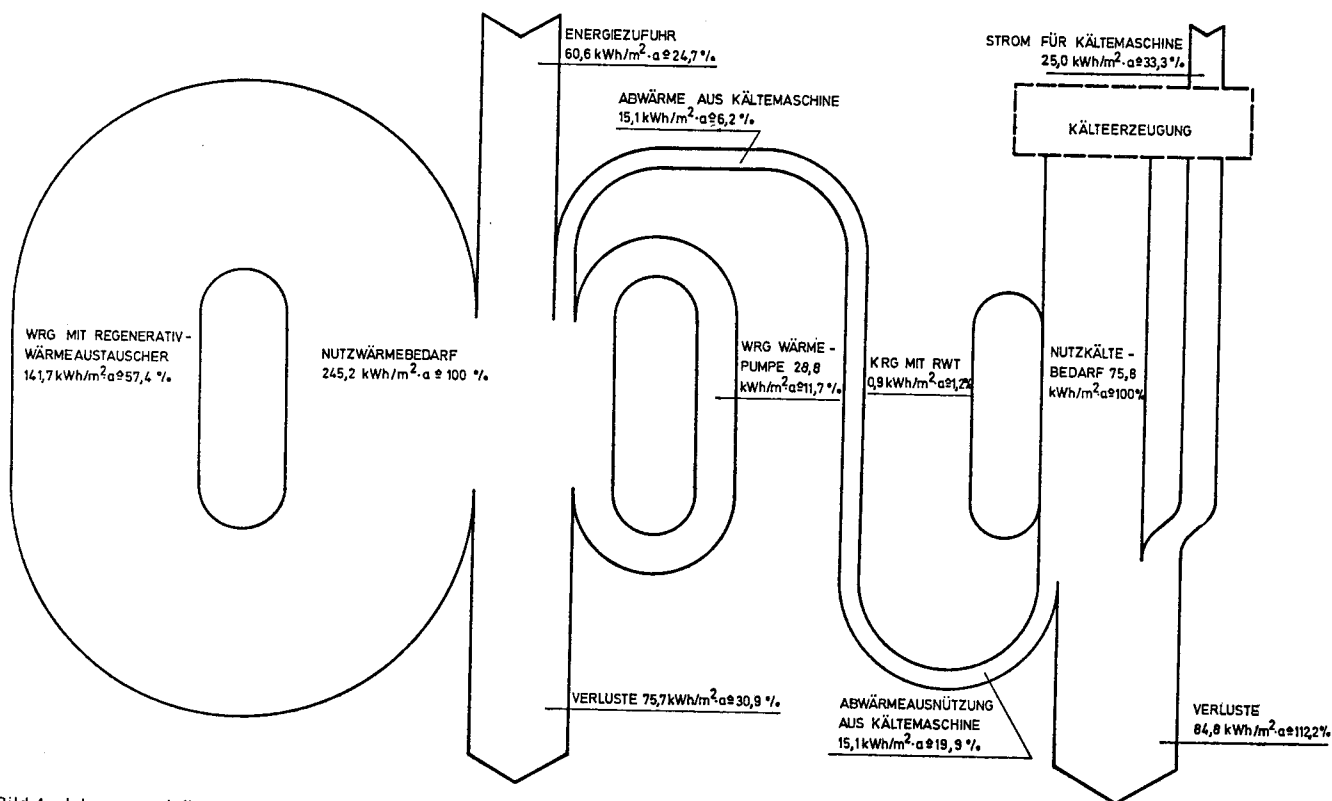


Bild 4: Jahresenergiefluß für den Wärme- und Kältebedarf der Klimaanlagen und der Lüftungsanlage für Flur und WC je Quadratmeter klimatisierte Bürofläche

Fig. 4: Annual energy flow for heating and comfort-cooling and for ventilating the corridors and WCs per square metre of airconditioned floor area

Fig. 4: Flux annuel d'énergie pour les besoins de chaleur et de froid des installations de climatisation et d'aération pour les couloirs et WC, par mètre carré de superficie climatisée

Wärmerückgewinnung mit Regenerativwärmetauscher und Kältemaschine führt den maximalen täglichen Wärmebedarf während der Betriebszeit der Klimaanlage auf 15 % des Gesamtbedarfs am Auslegungstag zurück.

Mit steigender Außentemperatur nimmt der aufzuwendende tägliche Strombedarf bis etwa + 2 °C stark ab, darüber reduziert er sich geringer und wird bei etwa + 17 °C zu Null.

An klaren Tagen tritt bei Außentemperaturen unter + 10 °C ein geringer, annähernd konstanter Kühlbedarf während der Mittagszeit auf. Darüber steigt der tägliche Kühlbedarf annähernd linear mit der Außentemperatur an. Eine Kälterückgewinnung (KRG) mit dem Regenerativwärmetauscher ist nur in sehr geringem Umfang möglich, da die Ablufttemperatur durch die Wärmezufuhr aus der Beleuchtung bereits soweit aufgewärmt wird, daß ihre Enthalpie nur wenig unter der Enthalpie der Außenluft im Hochsommer liegt.

Um den Einfluß der Wärmerückgewinnung auf den Jahresenergiebedarf zu verdeutlichen, sind in Bild 4 die einzelnen Energieflüsse in einem Sankey-Diagramm dargestellt. Hierbei ist auch der Wärmebedarf der Lüftungsanlage für Flur und WC eingeschlossen. Es ist zu erkennen, daß nur 24,7 % des Nutz-

wärmebedarfs als Energie zugeführt werden müssen. 57,4 % können durch Einsatz des Regenerativwärmetauschers aus der Abluft zurückgewonnen werden. Mit Hilfe der Kältemaschine können 17,9 % eingespart werden, wobei 6,2 % durch Ausnutzen der Abwärme der Kältemaschine im Kühlbetrieb und 11,7 % im Wärmepumpenbetrieb aus der mit dem Regenerativwärmetauscher erwärmten Zuluft gewonnen werden.

Von den verbleibenden 24,7 % des Nutzwärmebedarfs muß rund ein Drittel aufgebracht werden für die Bedarfsdeckung während der Betriebszeit der Klimaanlage, etwa ein Drittel wird für die Wochenenden und das restliche Drittel für den Nachtbedarf an Arbeitstagen benötigt.

Eine Kälterückgewinnung mit dem Regenerativwärmetauscher schlägt sich mit 1,2 % auf Einsparungen im jährlichen Nutzkältebedarf nur geringfügig nieder.

SCHRIFTTUM

- [1] Rouvel, L.: Energiebedarf klimatisierter Gebäude. BWK 25 (1973) Nr. 11, S. 442-447
- [2] Rouvel, L.: Berechnung des wärmetechnischen Verhaltens von Räumen bei dynamischen Wärmelasten. BWK 24 (1972) Nr. 6, S. 245-262

veröffentlicht in der elektrowärme international:

Rouvel L., Wirtschaftliche Kombination von Anlagekomponenten für die integrierte
Energieversorgung von Gebäuden
elektrowärme international ,Band 32 (1974) Nr. A2, , S.A79/A82

PROF. DR.-ING. HABIL. LOTHAR ROUVEL
FACHGEBIET ENERGIETECHNIK UND -VERSORGUNG · THERMISCHE GEBÄUDESIMULATION

SÄULINGSTRASSE 4
80686 MÜNCHEN

TEL.: 089-576804 FAX: 089-5706641
ROUVEL@GEBSIMU.DE WWW.GEBSIMU.DE

