



Dieter Thiel

Nutzungsmöglichkeiten der natürlichen Nachtkühlung bei der Klimatisierung von Bürogebäuden*

Durch das Einblasen kühler Außenluft während der Nachtstunden, die sogenannte natürliche Nachtkühlung, kann ein Teil des sensiblen Kältebedarfs von Gebäuden gedeckt werden.

Wichtig ist dabei eine große aktivierbare Speichermasse sowie Betriebsweisen in Bereichen großer Temperaturdifferenzen zwischen Raumluft- und Außenlufttemperatur, um einen energiewirtschaftlichen optimalen Betrieb zu gewährleisten.

Exploitation possibilities of natural night cooling for air-conditioning of office buildings

By blowing in cold outside air during the night time, the so called natural night-cooling, is it possible to reduce the sensible cooling load of a building.

An important condition for the optimal energy efficient operation of the system is the availability of a large storage mass that can be activated during the periods of large temperature differences between outside air and room air.

Possibilités d'utilisation du refroidissement naturel nocturne pour la climatisation des bureaux

L'air froid qui vient de l'extérieur pendant les heures nocturnes, le refroidissement naturel, peut permettre de couvrir une partie des besoins en froid des bâtiments.

Dans ce but, il faut disposer d'une importante capacité de stockage que l'on puisse activer et de modes de fonctionnement dans les zones de grandes différences de température entre la température ambiante et la température extérieure pour garantir une exploitation optimale rentable au niveau énergétique.

Schlüsselwörter – Key Words

Natürliche Nachtkühlung, Kältespeicherung, Hohlraumboden, Kältebedarf, Gebäude- und Anlagensimulation, Bedarfskenngröße, Leistungszahl

natural night-cooling, cooling storage, cavity floor, cooling load, building and system simulation, characteristic quantity of demand, performance figure

Einleitung

Die ständig zunehmende thermische Belastung durch innere Lasten läßt an heißen Tagen in Büroräumen mit Fensterlüftung die Raumlufttemperaturen auf über 30 °C ansteigen. Das thermische Behaglichkeitsempfinden und damit auch die Leistungsfähigkeit der Raumnutzer wird dadurch erheblich verschlechtert.

Die notwendige Kühlung bei schonendem Umgang mit unseren Energieressourcen zu erbringen, zwingt dazu, energiesparende und umweltfreundliche Wege bei der Kühlung einzuschlagen.

Eine Möglichkeit der Gebäudekühlung besteht in der sogenannten Nachtkühlung, d. h., durch Einblasen kühler Außenluft wird ein Gebäude nachts gekühlt, um das Aufschwingen der Raumlufttemperatur am nächsten Tag zu dämpfen.

Die Ausarbeitung faßt wichtige Ergebnisse einer Dissertation [1] zusammen, in der diese Möglichkeit der Gebäudekühlung untersucht wurde, und gibt Anregungen für optimierte Betriebsweisen.

1. Behaglichkeit

Das Behaglichkeitsempfinden des Menschen in einem Raum wird von einer Vielzahl zusammenhängender komplexer Größen wie die Konzentration von Schadgas, Kohlendioxid und Geruchsstoffen, die Luftgeschwindigkeit sowie die Temperatur von Raumluft und Umschließungsflächen und die relative Feuchte beeinflusst.

Können Größen wie Geschwindigkeit, Temperatur und Feuchte meßtechnisch noch leicht ermittelt werden, so wird im Entwurf der DIN 1946, Teil 2, vom August 1991 [2] zur Bewertung der Gase und Geruchsstoffe in Anlehnung an Ergebnisse von Fanger [3] erstmals die menschliche Nase als Meßinstrument der Luftqualität vorgeschlagen.

Danach ergeben sich zur Stofflastabfuhr erforderliche Luftwechsel zwischen zwei- und sechsfach pro Stunde.

Hier zeigt sich, wie wichtig es ist, genau wie bei den Anlagenkomponenten auch, bei der Ausstattung der Innenräume auf geeignete Materialien zu achten, auf die auch Wanner [4] hinweist.

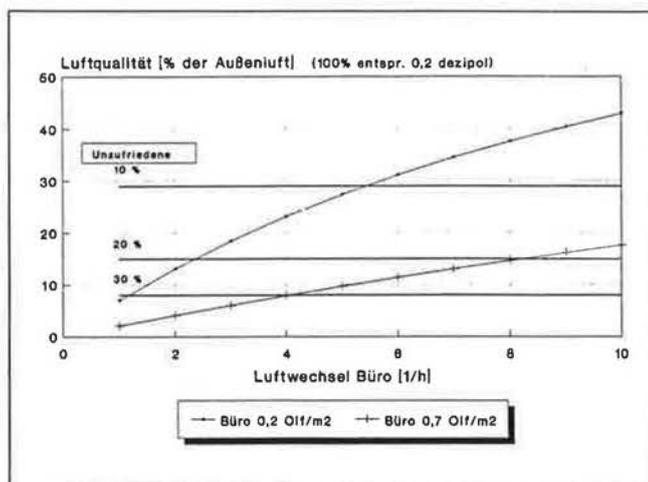


Bild 1 Luftqualität Büros
Werte gemäß Entwurf DIN 1946 T2 8/91.

Nur so bleibt der Klima- und Lüftungstechnik erspart, in Zukunft durch groß dimensionierte Anlagen Symptome kranker Gebäude behandeln zu müssen.

Die Aufgabe der haustechnischen Anlage muß darauf beschränkt bleiben, nichtvermeidbare Stoff- und Wärmelasten abzubauen und so ein Raumklima zu schaffen, das sich innerhalb des Behaglichkeitsfeldes nach DIN 1946 bewegt.

* Manuskript eingereicht im Februar 1992

Danach darf an heißen Tagen die Raumlufttemperatur auf 27 °C entgleiten, sollte aber bei Außenlufttemperaturen kleiner 26 °C die 25 °C-Grenze nicht überschreiten.

Geht man von einer Wasserdampfabgabe der Personen von ca. 1 g/kg tr. Luft bei einer Außenluftfrate von 60 m³/h pro Person aus, dann lassen sich bei Einhaltung des maximalen Wassergehaltes von 11,5 g/kg tr. Luft folgende Luftzustandsbereiche definieren:

- Bereich I bei dem nur gekühlt, aber nicht entfeuchtet werden muß
mit x kl. 10,5 g/kg tr. Luft
und t_R gr. 26 °C bei t_{au} gr. 26 °C
oder t_R gr. 25 °C bei t_{au} zwischen 22 °C und 26 °C
- Bereich II bei dem nur entfeuchtet werden muß
mit x gr. 10,5 g/kg tr. Luft
und t_R kl. 26 °C bei t_{au} kl. 26 °C
oder t_R kl. 25 °C bei t_{au} zwischen 22 °C und 26 °C
- Bereich III bei dem entfeuchtet und gekühlt werden muß
mit x gr. 10,5 g/kg tr. Luft
und t_R gr. 26 °C bei t_{au} gr. 26 °C
oder t_R gr. 25 °C bei t_{au} zwischen 22 °C und 26 °C

Die Beeinflussung der Außenlufttemperaturzustände durch die individuellen Gegebenheiten im Raum, die zu einer Veränderung von Temperatur und Wassergehalt beitragen, können mit Hilfe des Simulationsprogrammes TABS [5] unter Berücksichtigung der Gebäudedynamik berechnet werden.

Für den Standort Essen lassen sich für einen typischen Büroraum anhand des Testreferenzjahres TRY 3 den oben definierten Bereichen in Abhängigkeit der inneren Lasten pro Jahr folgende Anzahl von Stunden zuordnen:

Tabelle 1 Jährliche Anzahl der Stunden zwischen 7.00 und 18.00 Uhr, an denen die Zulufttemperatur gekühlt oder entfeuchtet werden muß.

	20 W/m ²	40 W/m ²
Bereich I nur Kühlen	76	181
Bereich II nur Entfeuchten	145	151
Bereich III Kühlen und Entfeuchten	83	141
Summe nur Kühlen	76	181
Summe Entfeuchten	228	292

Die Werte gelten für ein Gebäude ohne abgehängte Decke und dreifachen Außenluftwechsel. Die Anzahl der Stunden, an denen entfeuchtet und damit auch gekühlt wird, ist danach weitaus größer als die Zahl der Stunden, an denen nur eine Kühlung notwendig ist.

2. Musteranlage

Die Behaglichkeitskriterien bildeten die Bewertungsgrundlage einer Lüftungs- und Nachtkühlanlage, wie sie beim Verwaltungsgebäude Vorwerk in Wuppertal realisiert und im Rahmen eines BMFT-Forschungsprojektes [6] über zwei Jahre lang meßtechnisch begleitet wurde.

Die Messungen wurden in einem nach Norden bzw. Süden orientierten Referenzraum von je knapp 20 m² Grundfläche durchgeführt.

Charakteristisches Merkmal des Gebäudes ist ein zur Luftführung genutzter Hohlraumboden, der im Gegensatz zu den Plattendoppelböden aus einer fugenlosen durchgehenden Estrichkonstruktion besteht [7] und auch zur Elektroversorgung genutzt werden kann [8].

Er besitzt eine lichte Höhe von 10 cm bei einem Flächengewicht von ca. 90 kg/m².

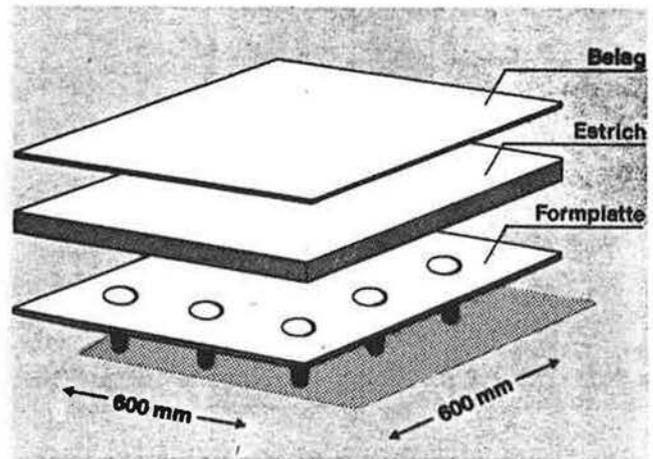


Bild 2 Hohlraumboden.

Anlagentechnik

Die Belüftungsanlage ist im Tagbetrieb für einen 1,5fachen Außenluftwechsel ausgelegt. Die Fenster sind zusätzlich öffenbar. Während heißer Sommertage kann nachts durch das Einblasen kühler Nachtluft mit doppelter Tagluftmenge gekühlt werden.

Der als luftdichter Druckboden ausgeführte Hohlraumboden, auf dem die Raumtrennwände direkt aufgesetzt sind, hat aufgrund eines großen freien Querschnittes einen geringen Druckverlust, so daß pro Etage nur drei Einspeisepunkte von je 900 m³/h erforderlich sind.

Der Nachtkühlbetrieb erfolgt bei Überschreitung einer Raumlufttemperatur von 22 °C immer dann, wenn gleichzeitig die Außenlufttemperatur unterhalb 22 °C liegt.

Meßergebnisse

Die für den Nachtkühlbetrieb typischen Raumlufttemperaturverläufe wiesen trotz ausgeprägter Außenlufttemperaturamplitude nur eine vergleichsweise geringe Schwankung auf. Auch die Zulufttemperatur am Luftdurchlaß blieb weitestgehend konstant und lag deutlich unterhalb der Außenlufttemperatur.

Nach dem Einschalten der Nachtkühlung am 20.8. um 22.00 Uhr fiel die Raumlufttemperatur ebenso wie die Zulufttemperatur am Luftdurchlaß um ca. 1 K auf 24 °C.

Während der Nachtkühlung war die Außenluft ca. 6 K kühler als die Raumluft.

Auch am folgenden Tag stiegen Zuluft- und Raumlufttemperatur kaum an. Dabei lag die Zulufttemperatur bis zu 8 K unterhalb der Außenlufttemperatur vor der Südfassade.

Der Vergleich der Lufttemperaturen im Hohlraumbodenspalt verdeutlicht die Erwärmung der Zuluft auf dem Weg von der Einspeisestelle bis zum Luftdurchlaß. Die nächtlichen Temperaturdifferenzen von ca. 2,5 K verringerten sich zwar im Tagesverlauf auf ca. 0,5 K, aber die Lufttemperatur im Hohlraumbodenspalt überstieg auch während der heißen Tageszeit nie die Raumlufttemperatur.

Die Darstellung der Summenhäufigkeit der Raumlufttemperaturen macht deutlich, daß im Südraum während der Bürozeit nur an ca. 180 Stunden pro Jahr Raumlufttemperaturen von 26 °C überschritten wurden.

Aufgrund fehlender direkter Sonneneinstrahlung sowie kühlerer Außenluft vor der Fassade traten höhere Raumlufttemperaturen im Nordraum nur an 80 Stunden pro Jahr auf.

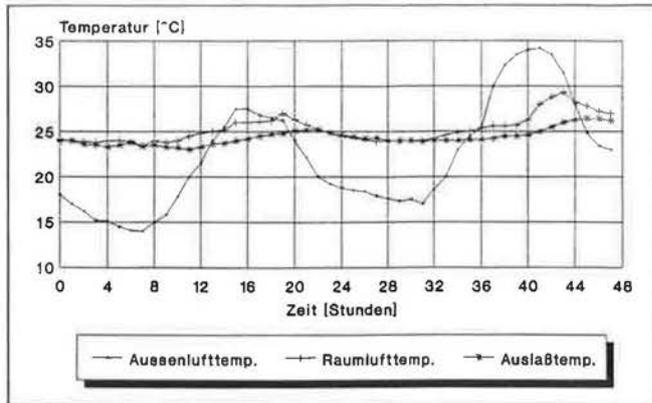


Bild 3 Temperaturverläufe
Raumluft, Zuluft, Außenluft (Meßergebnisse Vorwerk, 20.–21.8.87).

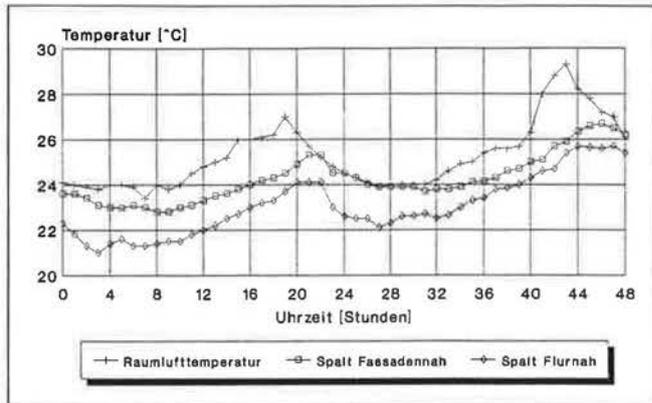


Bild 4 Temperaturverläufe
Lufttemperaturen im Hohlraumbodenspalt (Meßergebnisse Vorwerk, 20.–21.8.87).

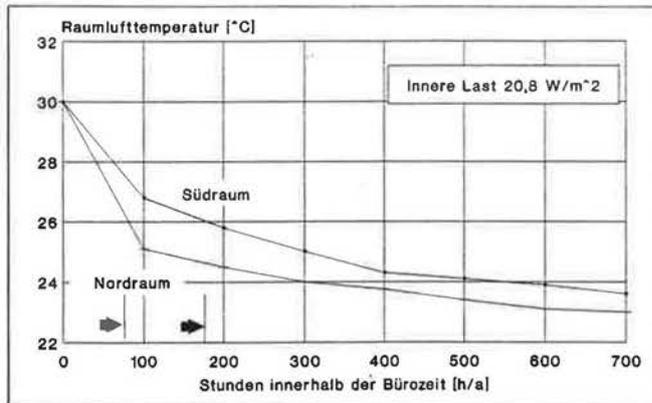


Bild 5 Raumlufttemperaturen
Summenhäufigkeit Nord- und Südraum (Meßergebnisse Vorwerk).

Kälteleistung und Förderenergie

Zur Ermittlung der durch die Luft erbrachten Kühlleistung ist sowohl eine raumbezogene als auch gebäudebezogene Definition möglich. Raumbezogen charakterisiert dabei diejenigen Größen, die nur den Meßraum unmittelbar betreffen, im Gegenteil zu gebäudebezogenen. Damit sind alle diejenigen Größen gemeint, die sich aufgrund der Zulufttemperatur in der Zentrale errechnen. Analog zur Kälteanlage stellt auch bei der Nachtkühlung die Leistungszahl als Quotient aus Kälteleistung und Förderenergie ein wichtiges Bewertungskriterium dar.

$$\epsilon = \frac{QK}{P_{elt}} \quad [-]$$

mit: QK = Kälteleistung der Luft
P_{elt} = Förderenergie

Die zur Leistungsberechnung erforderliche Temperaturdifferenz zeigt Bild 6.

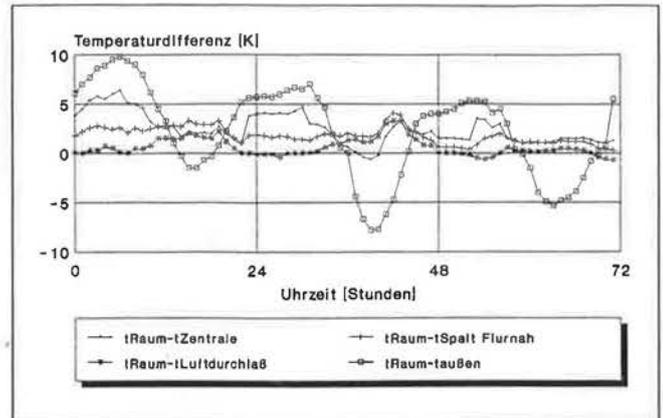


Bild 6 Temperaturdifferenzen
Raumlufttemperaturbezogen (Meßergebnisse Vorwerk, 20.–22.8.87).

Die Temperaturdifferenz zwischen Raumluft- und Außenlufttemperatur schwankt zwischen 10 K in der Nacht des 20.8. und 5 K in der Nacht zwischen 21. und 22.8.

Die das thermische Verhalten des Gebäudes beeinflussende Temperaturdifferenz zwischen Raum und Zentrale bewegt sich maximal zwischen 6 K am 20.8. und knapp 4 K am 22.8. Im Mittel ist die Zuluft in der Zentrale außerhalb der Bürozeit 4–2 K und innerhalb der Bürozeit rund 3–2 K kühler als die Temperatur der Raumluft. Beim Eintritt in den Hohlraumboden des Meßraums bewegt sich die Zulufttemperatur noch ca. 2,7 bis knapp 1 K unterhalb der Raumluft.

Mit diesen Temperaturdifferenzen lassen sich unter Zugrundelegung der Luftmengen und Förderenergien die Leistungszahlen gebäude- respektive raumbezogen ermitteln.

Tabelle 2 Betriebsdaten der Meßräume

	Zuluft [m³/h]	Förderenergie [W]
Sommertagbetrieb 4.00–19.00 Uhr	76	43
Nachtkühlbetrieb 19.00–4.00 Uhr	152	119

Während der drei heißen Tage stellen sich Leistungszahlen ein, die raumbezogen zwischen 0,8 und 1,5 schwanken und gebäudebezogen zwischen 1,8 und 3,8 liegen.

Mit Hilfe des Simulationsprogramms TABS [5] wurde neben den Messungen das Betriebsverhalten eines Büroraums mit einer inne-

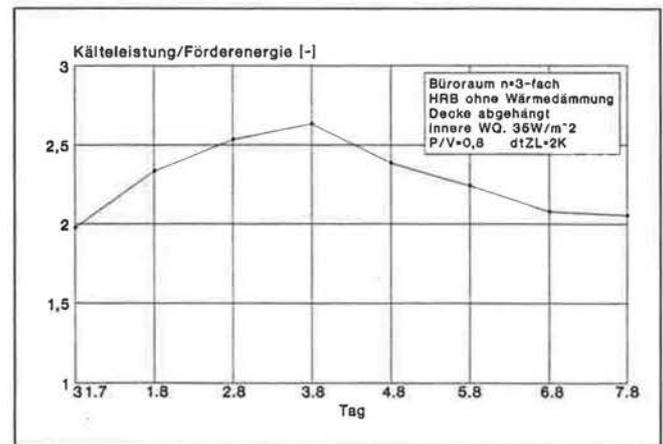


Bild 7 Nachtkühlung mit Hohlraumboden
Mittlere tägliche Leistungszahlen, 31.7.–7.8., gemäß TRY 3.

ren Last von 35 W/m^2 simuliert und anhand des Testreferenzjahres für Essen die Temperaturdifferenzen zwischen Raumluft und Zuluft für eine Schönwetterperiode ermittelt, wobei sich die Zuluft aus der durch die Wärmeabgabe der Gebläse um 2 K erhöhten Außenlufttemperatur errechnet.

Bei einem Energieaufwand von $0,8 \text{ W}$ pro stündlich gefördertem Luftvolumen ergeben sich resultierend aus der Dauer des Nachtkühlbetriebs mittlere tägliche Leistungszahlen zwischen 2 und 2,6 (Bild 7).

3. Wirtschaftlichkeit der Nachtkühlung

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit liegt der Vergleich mit einer mechanischen Kälteanlage nahe, obwohl er dadurch schwierig wird, weil es nur mit der Kälteanlage möglich ist, jederzeit eine genau definierte Kälteleistung für ein Gebäude bereitzustellen und durch die Entfeuchtung der Zuluft höhere Anforderungen an die Behaglichkeit zu erfüllen.

Neben der bekannten Leistungszahl ist die Bedarfskenngröße entscheidend, die angibt, wie effektiv die elektrische Energie zum Lufttransport in der Anlage genutzt wird.

Der Vergleich einer Reihe ausgeführter Anlagen hat gezeigt, daß im allgemeinen bei neueren Lüftungsanlagen ca. $0,8 \text{ W}$ elektrische Energie zur Förderung eines Kubikmeters Luft pro Stunde benötigt werden. Die Meßwerte bei Vorwerk ergaben eine Bedarfskenngröße für das Gesamtgebäude von $0,85$. Bei der Rela-Studie [9] aus dem Jahr 1982 lagen die Bedarfskenngrößen bei ca. $1,2$.

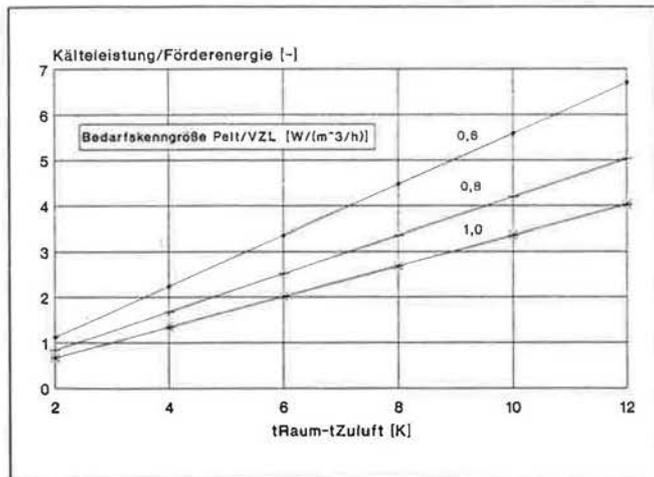


Bild 8 Nachtkühlung - Leistungszahlen.

Der lineare Zusammenhang zwischen der die Kälteleistung der Luft bestimmenden Temperaturdifferenz und der Leistungszahl verdeutlicht, wie wichtig es ist, bei Nachtkühlungsanlagen für eine kleine Bedarfskenngröße, also kleinen Anlagendruckverlust, zu dimensionieren, um Leistungszahlen ähnlich wie bei Kälteanlagen im Bereich zwischen 3 und 4 zu erreichen.

Für einen energiewirtschaftlich optimalen Nachtkühlbetrieb ist es daher eine wichtige regeltechnische Aufgabe, Anlagen nur im Bereich großer Temperaturdifferenz, d. h. größer ca. 6 K , zwischen Zuluft und Raumluft zu betreiben.

Betriebswirtschaftlich gesehen hat eine Nachtkühlanlage den Vorteil, daß sie zusätzlich zur bestehenden Lüftungsanlage keine weitere Investition und damit auch keine zusätzlichen Kapitalkosten erfordert. Der unter Umständen anfallende Mehraufwand für die Instandhaltung und Wartung ist vernachlässigbar gering, so daß sich die Kälteerzeugungskosten bei Nachtkühlung auf die reinen Förderkosten reduzieren (Bild 9).

Zur Berechnung des Kältepreises bei mechanischer Kühlung sind

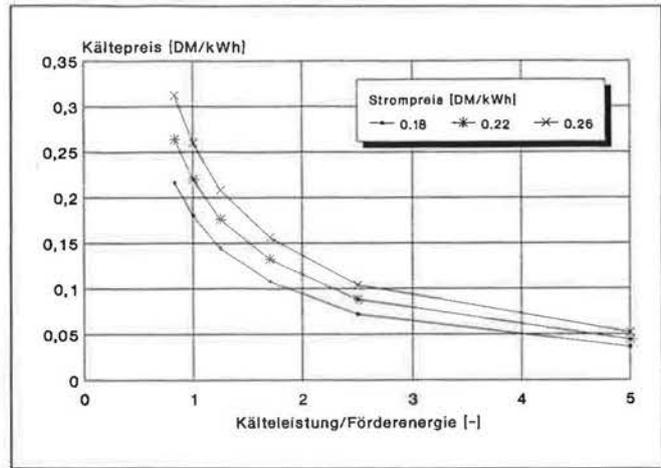


Bild 9 Nachtkühlung - Kälteerzeugungspreis und Leistungszahl.

dagegen neben den reinen Verbrauchskosten auch die Kapital- und Betriebskosten ausschlaggebend.

Kapitalisiert man die Investitionskosten von $1000,-$ bis $1500,-$ DM pro installierter kW-Kälteleistung gemäß VDI 2067 [10] mit einem Zinssatz von 8% und einer Lebensdauer von 15 a , rechnet für die Instandhaltung und Wartung mit 3% der Investition, dann ergibt sich bei einem Strommischpreis von $0,24 \text{ DM/kWh}$ und einer Leistungszahl von 4 der in Bild 10 dargestellte Kältepreis.

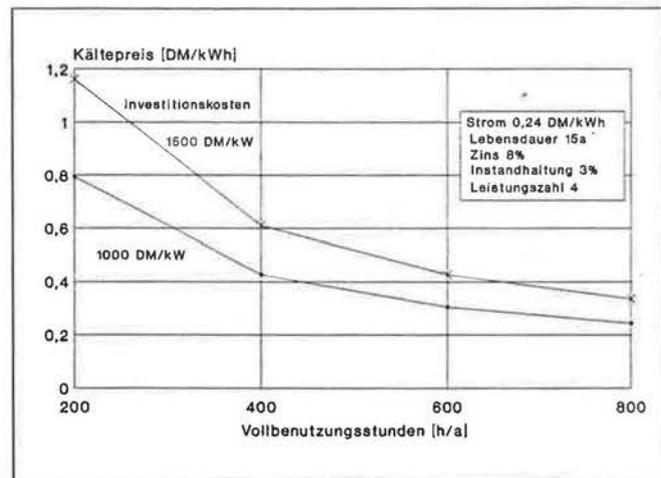


Bild 10 Mechanische Kühlung - Kälteerzeugungspreis und Vollbenutzungsstunden.

Nach Ergebnissen der Rela-Studie [9] schwanken die Vollbenutzungsstunden bei Kälteanlagen zwischen 250 und 500 Stunden pro Jahr.

Bei Anlagen mit 500 Vollbenutzungsstunden pro Jahr kostet dann die Kilowattstunde Kälte knapp $0,5 \text{ DM}$ bei einem Verbrauchskostenanteil von $0,08$ bis $0,06 \text{ DM/kWh}$.

Trotz niedriger Verbrauchskosten ergeben sich aufgrund der teuren Investition damit recht hohe Gesamtkosten für den Kältepreis bei mechanischer Kühlung.

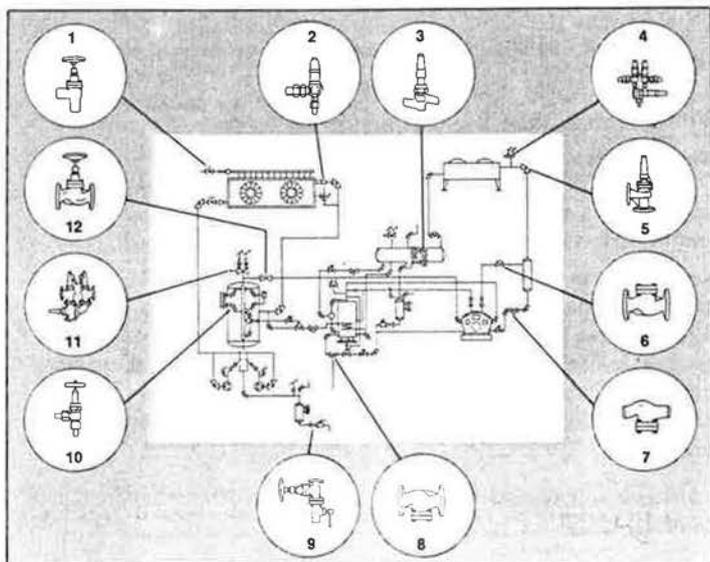
Rein betriebswirtschaftlich gesehen würden danach selbst noch Nachtkühlanlagen mit einer Leistungszahl kleiner 1 wirtschaftlicher arbeiten.

Die Nachteile der Nachtkühlung liegen darin begründet, daß die Gewährleistung einer bestimmten Kälteleistung wegen der nicht vorhersehbaren meteorologischen Gegebenheiten genausowenig möglich ist wie die häufig notwendige Entfeuchtung.

Energiewirtschaftlich optimierte Anlagenkonzepte sollten daher bivalent betrieben werden, d. h., Nachtkühlung immer dann,

HERL-Ventile – optimale Bauelemente für jede Kälteanlage!

HERL-Armaturen zeichnen sich durch zuverlässige, langlebige Funktion, kurze Lieferzeiten und konkurrenzfähige Preise aus. Deshalb sind HERL-Ventile die optimalen Bauelemente für jede Kälteanlage. Auch für Ihre!



HERL-Armaturen passen haargenau in jedes Kälteschema.

HERL-Armaturen passen in Ihre Kälteanlage genauso gut wie in die oben abgebildete zweistufige NH₃-Gefrieranlage. HERL-Armaturen werden allen Ihren Anforderungen gerecht. Sie wählen zwischen verschiedenen Werkstoffen, zwischen Flansch- und Einschweißventilen, zwischen DIN- und ANSI-Ventilen oder entscheiden sich für die „Neuen Kleinen“, die Ventilbaureihe in kleinerer und leichter Bauart.

- | | |
|--|--|
| 1. Eck-Absperrventil zum Einschweißen, mit Handrad „HERL-T 20“ | 7. Schmutzsammler zum Einschweißen, „HERL-T 39“ |
| 2. Eck-Sicherheitsventil 1/2", bauteilgeprüft, „HERL-T 21“ | 8. Schmutzsammler mit Flanschen, „HERL-T 40“ |
| 3. Durchgang-Absperrventil zum Einschweißen, mit Kappe, „HERL-T 5“ | 9. Öl-Ablaufventil mit Flanschen, „HERL-T 38“ |
| 4. Wechsel-Sicherheitsventil-Kombination, „HERL-T 19“ | 10. Eck-Absperrventile mit Anschweißstüben, mit Handrad, „HERL-T 37“ |
| 5. Überströmventil mit Flanschen, „HERL-T 22“ | 11. Wechsel-Sicherheitsventil-Kombination, „HERL-T 24“ |
| 6. Rückschlagventil mit Flanschen, „HERL-T 26“ | 12. Durchgang-Absperrventil mit Flanschen, mit Handrad, „HERL-T 10“ |

HERL schickt Ihnen ausführliche Unterlagen. Bitte anfordern.

M. G. HERL
Armaturenfabrik GmbH & Co. KG
Emil-Hoffmann-Straße, POB 501420
D-5000 Köln 50 (Rodenkirchen)
Telefon (0 22 36) 39 00-0
Telefax (0 22 36) 39 00 39
Telex 8 881 167 HERLD

HERL

wenn ein Betrieb mit Leistungszahlen größer der einer mechanischen Kälteanlage möglich ist. Die Entfeuchtung und der Betrieb bei kleinen Temperaturdifferenzen wird über die Kälteanlage sichergestellt.

4. Zusammenfassung

Mit Hilfe der Nachtkühlung ist es in Verbindung mit dem gut speichernden Hohlraumboden und einer Lüftungsanlage durch sensiblen Wärmeeintrag aus der Zuluft möglich, ein Gebäude zu kühlen.

Die Meßergebnisse machen deutlich, daß dadurch in Südräumen mit nicht abgehängter Decke bei einer inneren Last von 20,8 W/m² die Bürozeit, während der eine Raumlufttemperatur von 26 °C überschritten wurde, auf ca. 180 Stunden jährlich begrenzt bleibt.

Um den Betrieb der Nachtkühlanlage mit großen Leistungszahlen zu gewährleisten, sollte die Anlage nur bei großer Temperaturdifferenz zwischen Außenluft- und Raumlufttemperatur betrieben werden. Die Ergebnisse von Simulationsberechnungen zeigen, daß bei den für Mitteldeutschland geltenden klimatologischen Randbedingungen während des Sommers bei einem Gebäude mit üblichen inneren Wärmelasten (35 W/m²) im Mittel an heißen Tagen während der Nachtstunden eine Temperaturdifferenz zwischen Raumluft- und Außenlufttemperatur von ca. 8 K herrscht.

Unter Berücksichtigung der Zulufterwärmung durch Gebläse und Kanalsystem lassen sich im Mittel Leistungszahlen von $\epsilon = 2,3$ realisieren.

Auch wenn die kleinen Leistungszahlen und die relativ hohen Verbrauchskosten durch den hohen Kapital- und Betriebskostenanteil bei mechanischer Kühlung relativiert werden, kann eine Nachtkühlanlage keine Kälteanlage ersetzen. Nur durch eine Kälteanlage ist sichergestellt, daß die zum Einhalten einer behaglichen Raumluftfeuchte im Sommer notwendige Entfeuchtung der Außenluft stattfindet. Daneben leistet sie eine wertvolle Hilfe bei der Verhinderung von Feuchteschäden.

Bei üblichen Kühllasten ist die Anzahl der Stunden, an denen die Außenluft entfeuchtet werden muß, größer als die, an denen nur eine sensible Kühlung notwendig ist.

Anlagenbetreiber, die allen Anforderungen gerecht werden sollen, können daher auf eine Kälteanlage und die damit verbundene Investition nicht verzichten. Im bivalenten Betrieb ist dann durch geschickte Regelung eine Nachtkühlung im Bereich hoher Leistungszahlen möglich.

Bei Gebäuden, die lediglich über eine Lüftungsanlage verfügen, ist eine Kühlung durch Nachtkühlung nur in einem Rahmen realisierbar, der keine Gewährleistung für das Einhalten einer maximalen Raumlufttemperatur und maximalen Raumluftfeuchte erforderlich macht.

Literatur

- [1] Thiel, D.: Möglichkeiten und Grenzen der natürlichen Nachtkühlung als Mittel zur Kühlung bei der Klimatisierung von Bürogebäuden. Dissertation, VDI-Fortschrittberichte Nr. 54, Reihe 19, 1991.
- [2] DIN 1946 T 2, Entwurf August 1991.
- [3] Fanger, Ole, P.: Ein neues Komfortmodell für Raumluftqualität. Ki 7-8/1990.
- [4] Wanner, U.: Luftqualität in Innenräumen. TAB 8/83.
- [5] Schmidt Reuter Partner, Ingenieurgesellschaft: TABS-Thermische Analyse und Bauten Simulation. Leistungsbeschreibung 1991.
- [6] Thiel, D.: Meßtechnische Begleitung bei der Erstellung eines integrierten neuen Technischen Konzeptes zur Belüftung, Beheizung und natürlichen Klimatisierung. BMFT-Forschungsvorhaben Förderkennz. 0338 655A.
- [7] Fa. Goldbach, Goldbach; Fa. Norina, Nürnberg: Technische Informationen Hohlraumboden 1989.
- [8] Thiel, D.: Hohlraumböden für zukunftssichere Verwaltungsgebäude. Beratende Ingenieure 5, 1985.
- [9] Bach, H., Detzer, R., Fitzner, K., Radtke, W., u. a.: Reduzierter Energieeinsatz für raumlufttechnische Anlagen bei Verwendung einer Luftführung von unten nach oben. BMFT-Forschungsbericht T82-023, 1982.
- [10] VDI 2067 Blatt 1, Dezember 1983.