

# Rationelle Energienutzung in Gebäuden



## Handbuch der passiven Kühlung

Mark Zimmermann  
EMPA

Juni 1999

\* EMPA



unterstützt durch das  
Bundesamt für Energie BFE

*Adressen der Verfasser  
und Mitautoren*

Heini Glauser Energie Architektur Sanierungen Information Dohlenweg 2a CH-5210 Windisch e-mail easi@pop.agri.ch	Ingo Plato Dipl. Ingenieur RWTH Aachen Huhnsgasse 36-38 D-50 676 Köln e-mail buetzjesnett@t-online.de(Plato)
Arthur Huber Huber Energietechnik Jupiterstrasse 26 CH-8032 Zürich e-mail huber@igzh.com	Stefan Remund EMPA Abt. Verbrennungsmotoren/Feuerungen CH-8600 Dübendorf e-mail stefan.remund@empa.ch
Beat Kegel Ernst Basler & Partner Mühlebachstrasse 11 CH-8008 Zürich e-mail ebasler@dial.eunet.ch	Gerhard Zweifel Hochschule für Technik und Architektur CH-6048 Horw e-mail gzweifel@hta.fhz.ch
Markus Koschenz EMPA Abt. Energiesysteme/Haustechnik CH-8600 Dübendorf e-mail markus.koschenz@empa.ch	Mark Zimmermann EMPA ZEN Zentrum für Energie und Nachhaltigkeit im Bauwesen CH-8600 Dübendorf e-mail mark.zimmermann@empa.ch
Hanspeter Krüttli Sulzer Infra Lab AG Zürichstrasse 19/15 CH 8401 Winterthur e-mail hanspeter.kruettli@sulzer.ch	
Beat Lehmann EMPA Abt. Energiesysteme/Haustechnik CH-8600 Dübendorf e-mail beat.lehmann@empa.ch	
Robert Meierhans Meierhans & Partner Talgartenstrasse 2 CH-8117 Fällanden e-mail meierhans@access.ch	

*Impressum*

Handbuch der passiven Raumkühlung, Juni 1999

Auflage 800

ISBN 3-905594-06-4

EMPA ZEN, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, 3003 Bern

Copyright: EMPA ZEN, Nachdruck mit Quellenangabe gestattet

Bezug: EMPA ZEN, CH-8600 Dübendorf (Fax: +41 1 823 40 09, e-mail: zen@empa.ch)

Preis: CHF 40.- / DM 50.- exkl. MWST

*Rationelle  
Energienutzung  
in Gebäuden*

# ***Handbuch der passiven Kühlung***

*Mark Zimmermann, EMPA Dübendorf*

*Mit Beiträgen von:*

- *Heini Glauser*
- *Arthur Huber*
- *Markus Hubbuch*
- *Beat Kegel*
- *Markus Koschenz*
- *Hans-Peter Krüttli*
- *Beat Lehmann*
- *Robert Meierhans*
- *Ingo Plato*
- *Stefan Remund*
- *Gerhard Zweifel*

*im Auftrag des  
Bundesamtes für Energie*

*Juni 1999*

# ***Inhaltsverzeichnis***

1. Einleitung	5
2. Kühlleistungsbedarf	9
3. Systemwahl	19
4. Natürliche und mechanische Nachtlüftung	31
5. Verdunstungskühlung	37
6. Luftansaug-Erdregister	45
7. Erdsonden und Energiepfähle	57
8. Bauteilkühlung	65
9. Lokale Kühlung	73



# 1. Einleitung

Ein komfortables Raumklima ist wichtig für unser Wohlbefinden und in der Regel überhaupt die Hauptfunktion unserer Gebäude. Dabei kann Kühlen genauso wichtig sein wie Heizen. Gegen kalte Temperaturen können wir uns sogar besser schützen als gegen zu warme. Allerdings sind die Klimabedingungen in der Schweiz so, dass meist auf eine Gebäudekühlung verzichtet werden kann.

Immer häufiger sind jedoch die Fälle, bei denen spezielle Massnahmen erforderlich sind, um auch im Sommer ein komfortables Raumklima sicherzustellen. Die Ursachen für diese Entwicklung sind unterschiedlich:

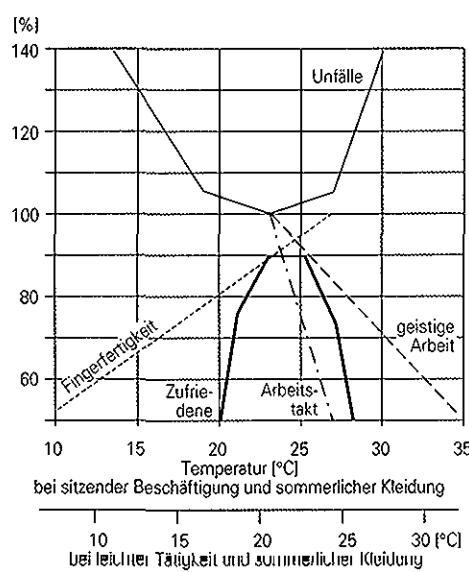
- In erster Linie sind es wohl die erhöhten Benutzeransprüche, die zu vermehrter Kühlung führen. Vor allem deshalb haben mobile Klimageräte stark wachsende Verkaufszahlen. Dass dies nicht unbedingt ein unnötiger Luxus ist, belegt eine schwedische Studie (D. Wyon). Sie zeigt, dass bei Raumtemperaturen von 23 °C die Leistungsfähigkeit am besten ist und bei höheren Temperaturen die geistige und vor allem die körperliche Leistungsfähigkeit abnehmen (Figur 1-1).
- Die internen Wärmelasten haben – bedingt durch die zunehmende Verbreitung von Informatikmitteln – vor allem im Dienstleistungsgebäuden zugenommen. Sie wurden in der Vergangenheit oft überschätzt und durch die energetische Verbesserung der EDV-Mittel konnte die Zunahme der internen Lasten stark gebremst werden. Trotzdem hat der Stromverbrauch der Büromatik langsam aber stetig zugenommen.
- Nicht zuletzt dürfte aber auch falsches Benutzerverhalten für viele überwärmte Räume mitverantwortlich sein. Besonders bei energieeffizienten, hochisolierten Bauten können innere Wärmelasten nicht mehr so leicht abgeführt werden. Zwar schützt die Hülle im

## Grundlage des Handbuchs

Die Grundlagen für passives und hybrides Kühlen wurden durch mehrere schweizerische Projekte des Programmes "Vermeidung von Kühllast – Passive Kühlung" sowie im Rahmen des Projektes "Low Energy Cooling" der Internationalen Energieagentur erarbeitet. Das vorliegende Handbuch fasst die wichtigen Ergebnisse praxisbezogen für den Planer zusammen.

Hinweise zu den einzelnen Untersuchungen sind im Anhang zu finden.

Hinweise zu ausführlicheren Planungsinstrumenten und Rechenprogrammen sind in den betroffenen Kapiteln enthalten.



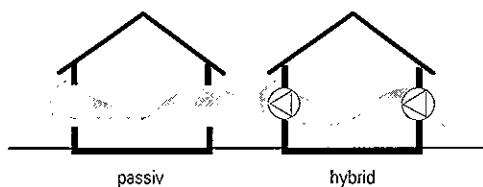
Figur 1-1:  
Sowohl bei zu tiefen wie bei zu hohen Temperaturen nimmt die Leistungsfähigkeit des Menschen rasch ab. Komfortable Raumtemperaturen sind deshalb nicht einfach Luxus, sondern auch eine Voraussetzung für gute Arbeitsplätze.

## Passive und hybride Kühlung

Streng betrachtet versteht man unter passiven Kühlsystemen bauliche Vorkehrungen, welche ohne mechanische Antriebe zur Kühlung des Gebäudes gezielt beitragen. Darunter sind vor allem die natürliche Belüftung, die Beschattung oder Massnahmen zur Verbesserung des Mikroklimas zu verstehen.

Diese Massnahmen sind, zusammen mit einem guten sommerlichen Wärmeschutz, immer bestmöglich zu berücksichtigen. In vielen Fällen genügen jedoch rein passive Massnahmen nicht. Nebst ihrer limitierten Kühlwirkung sind rein passive Systeme auf ein optimales Benutzerverhalten angewiesen und reagieren empfindlich auf Nutzungsänderungen (zusätzliche interne Lasten). Auch eine mögliche Klimaerwärmung würde ihre Wirksamkeit rasch schmälern.

Um nicht gleich aktive Kühlung mit Kältemaschinen betreiben zu müssen, können verschiedene sogenannte hybride Kühlsysteme eingesetzt werden. Hybride Systeme erlauben es, mit haustechnischen Installationen, natürliche Kältesenken (kühles Erdreich, kalte Nachtluft etc.) zu nutzen, indem sie gezielt Wärme abführen und Speichereffekte nutzen. Solche Systeme reichen von der einfachen mechanischen Nachtlüftung bis hin zu Betonkernkühlung.



Passive und hybride Systeme werden der Einfachheit halber unter dem Begriff *Passivsysteme* zusammengefasst.

In diesem Buch nicht behandelt werden Aktivsysteme, welche mittels Kältemaschinen dem Gebäude Wärme entziehen. Größere Anlagen (meist über 10 kW Kälteleistung pro Gebäude) sind bewilligungspflichtig, es sei denn, sie werden gleichzeitig auch für die Wärmeproduktion eingesetzt. Durch solche Doppelnutzungen können durchaus auch interessante Lösungen mit aktiver Kühlung realisiert werden.

Ebenfalls interessant sind Lösungen mit einem niedrigen Hilfsenergieverbrauch von weniger als 5 W/m<sup>2</sup> (Neubau) resp. 10 W/m<sup>2</sup> (Sanierung) für Lüftung und Klimatisierung. Die Musterverordnung des Bundes empfiehlt die Bewilligung dieser Anlagen.

Sommer auch sehr gut vor eindringender Wärme, offene oder unbeschattete grosszügige Fensterflächen lassen jedoch rasch zu viel Wärme hinein, die nicht mehr leicht abgeführt werden kann. Ebenso problematisch ist die Wärmeabgabe von Geräten und Beleuchtungen, die unnötig in Betrieb sind.

Es gibt aber auch falsche Bauweise, welche die raumklimatischen Anforderungen nicht angemessen berücksichtigt. Vor allem die passiven Sonnenenergiegewinne und die natürliche Belüftbarkeit der Räume brauchen ein Konzept, welches den Anforderungen des Winters, der Übergangszeiten und des Sommers gerecht wird. Zu oft wird eine Maximierung der Sonnenenergiegewinne angestrebt ohne gleichzeitig die Nutzung der Gewinne zu optimieren.

Obwohl dieses Handbuch die baulichen Voraussetzungen für den sommerlichen Wärmeschutz nur kurz streift (Kap. 2.4), stehen sie an erster Stelle eines guten Raumkühlkonzepts.

Schwerpunkt dieses Handbuchs sind hybride Kühltechniken (vgl. Kasten). Sie können in den meisten Fällen – mit einem geringen Energieaufwand – einen sehr guten Raumkomfort gewährleisten. Nicht zuletzt fördern sie aber den bewussten, korrekten Umgang mit Energie und verhindern den massiven Einsatz von Technik mit all seinen Problemen. Passive und hybride Kühltechniken reduzieren die Technik auf ein Minimum und vermeiden die negativen Auswirkungen von Klimaanlagen, wie Zugerscheinungen, Kondensation und mikrobielle Verschmutzung.

Das Handbuch stellt die Ergebnisse einer Reihe von Untersuchungen und Entwicklungsarbeiten vor, welche im Rahmen schweizerischer Forschungs- und Demonstrationsprojekte und im Rahmen der Zusammenarbeit mit dem Forschungsprogramm "Low Energy Cooling" der Internationalen Energieagentur gemacht wurden.

Das Handbuch will zeigen:

- wie der Kühlbedarf eines Gebäudes verringert und bestimmt werden kann,
- wie bei vorhandenem Kühlbedarf vorzugehen ist, welche Hilfsmittel zur Verfügung stehen und welche Vorschriften zu beachten sind,
- welche passiven Möglichkeiten für welche Anforderungen zur Verfügung stehen und auf was bei der Realisierung zu achten ist.

Ein besonderes Augenmerk wird auf die Kombination passiver, hybrider und aktiver Kühltechniken gelegt. Sehr häufig ist es nicht sinnvoll, nur auf eine Technik abzustützen. Genauso wie beim Beheizen, wo auch passive Sonnenenergiegewinne und Zusatzheizung kombiniert werden, können sich auch beim Kühlen verschiedene Techniken ideal unterstützen.

## Planung von Raumkühlssystemen

Im Gegensatz zur Heizung muss die Raumkühlung dynamisch betrachtet werden. Die Wärmelast kommt nicht so gleichmäßig verteilt wie der Heizbedarf. Durch eine geeignete, massive Bauweise kann dieses Problem entschärft, aber nicht ganz behoben werden.

Für einfache Fälle, insbesondere für die reine Komfortverbesserung, stellt dieses Handbuch eine Reihe von einfachen Planungsrichtlinien zur Verfügung. Diese werden ergänzt durch diverse einschlägige Richtlinien:

- SIA Empfehlung V382/2 "Kühlleistungsbedarf von Gebäuden" [2.1]
- SIA Empfehlung V382/3 "Bedarfsermittlung für lüftungstechnische Anlagen" [2.2]
- SWKI Richtlinie 95-3 "Jährlicher Energiebedarf von lüftungstechnischen Anlagen" [2.3]

Für schwierigere Fälle, das heisst vor allem für Nutzungen, bei denen eine max. Raumtemperatur garantiert werden muss, empfieilt es sich jedoch, dynamische Simulationen durchzuführen. Sie erlauben nicht nur eine Auslegung der Systeme, sondern auch eine Voraussage des Temperaturverlaufs. Auf die zur Verfügung stehenden Rechenhilfsmittel wird etwas ausführlicher in den einzelnen Kapiteln eingegangen.

Kapitel 3 *Systemwahl* gibt zugleich auch Hinweise zum zweckmässigen Vorgehen:

- Optimierung des sommerlichen Wärmeschutzes
- Realistische Einschätzung der Wärmelasten (intern und extern)
- Evaluation der konzeptionell geeigneten Systeme und Systemkombinationen
- Vorprojekt, Kosten- und Leistungsvergleich der in Frage kommenden Systeme
- Eventuelle detaillierte Systemsimulationen
- Eventuelle Überarbeitung des baulichen Konzepts



## 2. Kühlleistungsbedarf

Die Raumkühlung hat den Zweck, unerwünschte Wärmelasten, die eine Übererwärmung der Räume verursachen, abzuführen. Im Gegensatz zum Winter sind die Temperaturunterschiede in der Übergangszeit und vor allem im Sommer zwischen aussen und innen zu gering, um Wärme in genügendem Masse über die Transmission abzugeben.

Meistens sind die Wärmelasten jedoch nicht so gross, wie sie früher zur Berechnung der Kühllast angenommen wurden. Vor allem treten die verschiedenen Lasten nicht gleichzeitig und nicht konstant auf. In den neueren Planungsrichtlinien [2.1, 2.3] wurden deshalb die Planungswerte massiv reduziert.

Der Kühlleistungsbedarf wird primär bestimmt durch

- das Außenklima
- die Anforderungen an das Raumklima
- die internen und externen Wärmelasten
- die Bauweise

### Berechnung des Kühlleistungsbedarfs

Die genaue Bestimmung des Kühlleistungsbedarfs erfordert eine relativ aufwendige dynamische Gebäudesimulation. Mit dem Simulationsprogramm "IDEA Haustechnik - SIA 382 Bedarfsermittlung" [2.5] steht ein benutzerfreundliches Werkzeug zur Verfügung, welches es dem Planer erlaubt, ohne detaillierte Simulationserfahrung, dynamische Berechnungen durchzuführen.

Für die Bewilligung von Klimaanlagen (mit Kältemaschine) ist der Nachweis des Kühlleistungsbedarfs mit dynamischem Simulationsmodell immer erforderlich, es sei denn, die Kühlleistung ist kleiner als 10 kW. Gemäss *Musterverordnung des Bundes "Rationale Energienutzung in Hochbauten"* ist ebenfalls kein Bedarfsnachweis erforderlich, wenn die Kühlleistung direkt durch erneuerbare Energien bereitgestellt werden kann (z.B. Erdsonde, Seewasser, Kühlung im Erdreich). Gute Werte für den Hilfsenergieverbrauch liegen unter 5 W/m<sup>2</sup> (Neubau) resp. 10 W/m<sup>2</sup> (Sanierung).

Für die Planung passiver und hybrider Kühlkonzepte sind genauere Simulationen des Kühlleistungsbedarfs zwar auch sinnvoll, aber nicht immer notwendig. Es können auch einfachere "Handmethoden" angewendet werden, die in der Regel genügend genaue Ergebnisse ermöglichen.

Im Vordergrund stehen dazu die SIA-Empfehlungen V 382/2 "Kühlleistungsbedarf von Gebäuden" [2.1] und V 382/3 "Bedarfsermittlung für lüftungs-technische Anlagen" [2.2]. Die SWKI-Richtlinie 95-3 gibt ausführliche Angaben zu den internen Lasten [2.3].

### Interne Lasten

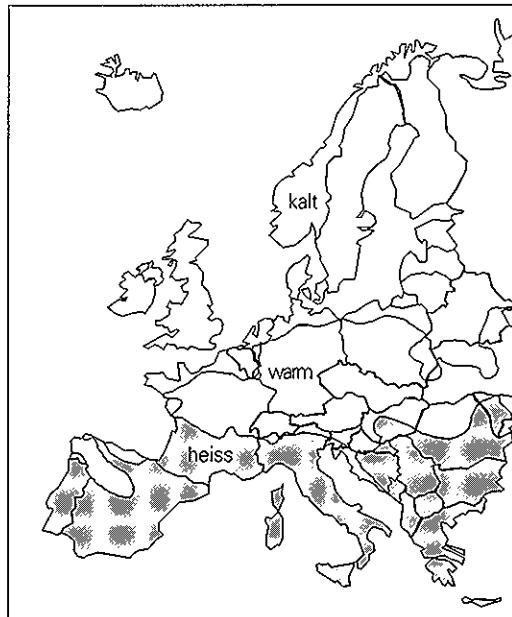
- Abwärme von Geräten (vor allem EDV- und Bürogeräte)
- Abwärme der Beleuchtung
- Abwärme der Personen (sensibler Anteil)

### Externe Lasten

- Sonnenenergiegewinne durch transparente Bauteile
- Transmissionswärmegewinne durch opake Bauteile
- Lüftungsgewinne durch eintretende, wärmere Außenluft

## 2.1 Aussenklima

*Figur 2-1:*  
Hauptklimazonen Europas gemäss ASHRAE 0.4 %. Im mitteleuropäischen Raum bestehen gute Voraussetzungen für passive und hybride Kühl-systeme. Einerseits besteht häufig Kühlbedarf, andererseits sind nutzbare, natürliche Kältesenken vorhanden.



Das Aussenklima bestimmt nicht nur die externen Lasten, die wegzuführen sind, es hat auch einen grossen Einfluss darauf, wie die Wärmelasten effizient abgeführt werden können.

In der Praxis entschärft sich das Kühlproblem in höher gelegenen Regionen sehr rasch, da einerseits eine geringere externe Wärmelast besteht und Wärmelasten wiederum einfacher abgeführt werden können. Dies ist sicher in Höhenlagen über 1'000 m ü.M. der Fall. Massnahmen zum Kühlen sind in diesen Regionen zwar meist sehr effizient, wegen des geringen Bedarfs jedoch häufig wenig wirtschaftlich. Nur wo grosse innere Wärmelasten abzugeführt werden müssen, sind spezielle Massnahmen zum Kühlen interessant. Die Grenzen werden dann häufig durch den Komfort gesetzt.

Die vorliegende Publikation befasst sich deshalb ausschliesslich mit den klimatischen Bedingungen Mitteleuropas. Den Berechnungen zugrundegelegt sind die Lufttemperaturen und Einstrahlungen für Zürich-Flughafen während einer heissen Periode im Monat August. Unberücksichtigt sind die Windverhältnisse, da in kritischen Situationen mit Windstille gerechnet werden muss.

Die Besonderheit des mitteleuropäischen Klimas liegt darin, dass die Lufttemperatur auch im Sommer oft um 20 °C pendelt. Auch während einer Reihe von Hitzetagen bleiben die Nächte meist kühl. Die Temperaturamplitude vergrössert sich an diesen Tagen von durchschnittlich 8 K auf bis zu 16 K, wodurch die Nachttemperatur kurzfristig fast immer unter 20 °C fällt.

Weniger standortabhängig ist die Globalstrahlung, da ihr Maximalwert massgebend ist. Es ist jedoch wichtig zu erkennen, dass die maximale Einstrahlung im Hochsommer nicht auf die Süd-fassade, sondern auf die Ost- und Westfassaden fällt. Besonders kritisch ist die Ostfassade, da die Einstrahlung bereits am frühen Morgen erfolgt und der Raum den ganzen Tag über zu warm bleibt (vgl. Figur 2-8).

## 2.2 Raumklima

Die Auslegung nach SIA-Empfehlung V 382/3 [2.2] für den Kühllastnachweis geht von einer maximalen Raumlufttemperatur von 28 °C aus. Diese dient der Bedarfsermittlung für die mechanische Kühlung und darf sogar um bis zu 30 Kelvin-Stunden pro Jahr überschritten werden. Hitzetage mit Temperaturen über 30 °C werden nicht berücksichtigt.

Für die Auslegung des Kühlleistungsbedarfs wird (in der Schweiz) allgemein von einer Raumlufttemperatur von 26 °C ausgegangen. Figur 2-2 verdeutlicht diese Werte.

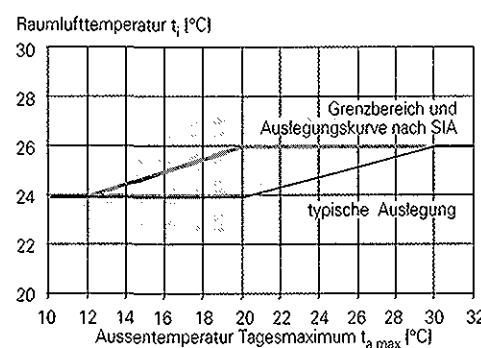
Der Einfluss der übrigen Raumklimafaktoren ist entweder weniger bedeutend als die Raumtemperatur oder für die Auslegung der Raumkühlung nicht geeignet. Gemäss Fanger sind dies:

- Strahlungsasymmetrie durch Temperaturunterschiede der Raumumschliessungsflächen,
- Luftbewegungen,
- Luftfeuchtigkeit.

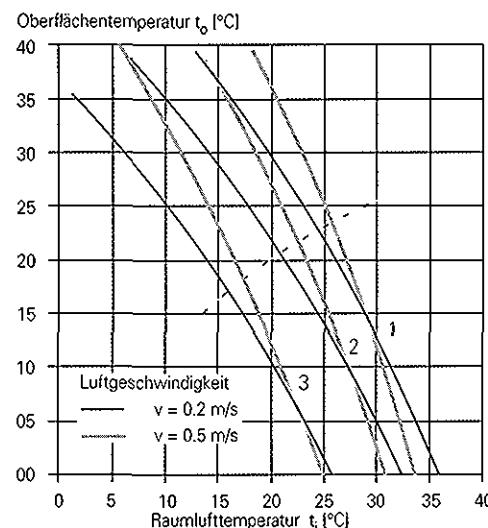
Figur 2-3 stellt den Einfluss von Strahlungsasymmetrie und Luftbewegung auf den Komfort des Menschen dar.

Eine Strahlungsasymmetrie, wie sie im Winter auftreten kann (z.B. infolge kalter Fensterscheiben) ist im Sommer wenig wahrscheinlich. Erwärmte Oberflächen deuten entweder auf ungenügende Bauweise oder auf einen ungenügenden Sonnenschutz hin. Eine erwünschte Wirkung kann jedoch mit leicht unterkühlten Bauteiloberflächen, wie sie bei der Bauteilkühlung oder bei Kühldecken auftreten, erreicht werden. Der Einfluss auf die empfundene Raumtemperatur dürfte etwa bei der Bauteilkühlung 1 K und bei aktiv gekühlten Kühldecken 1 bis 2 K betragen.

Auch Luftzug stellt ein gutes Mittel dar, um den Komfort auch bei Temperaturen um 30 °C zu verbessern. Natürlicher Durchzug stösst jedoch schnell an seine Grenzen. Einerseits herrscht an Hitzetagen häufig Windstille, andererseits führt bei hohen Außentemperaturen ein hoher Luftwechsel zu einer unerwünschten Erwärmung des Gebäudes. Zudem werden Zugerscheinungen, sei es natürlicher Luftzug oder durch Ventilatoren sehr rasch als störend empfunden.



Figur 2-2:  
Auslegungskurve und tolerierbarer Grenzbereich für Raumtemperaturen in Abhängigkeit zur Außentemperatur, nach SIA V382/3 (obere Kurve) und typische Auslegung (untere Kurve). Der tolerierbare Grenzbereich ist grau hinterlegt.

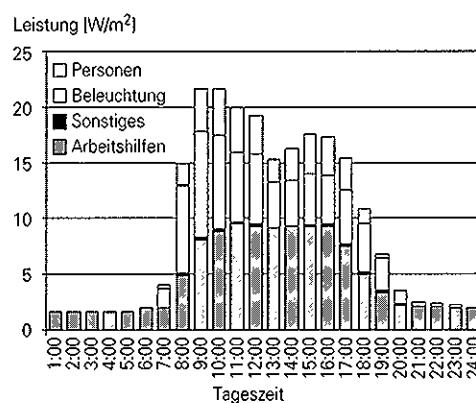


Figur 2-3:  
Komfortparameter nach Fanger und typisches Oberflächen-/Raumlufttemperaturverhältnis im Sommer (gestrichelte Linie)  
1 sitzend (100 W), mittlere Bekleidung (clo 1.0)  
2 mittlere Aktivität (200 W), leichte Bekleidung (clo 0.5)  
3 mittlere Aktivität (200 W), mittlere Bekleidung (clo 1.0)

Auch die relative Luftfeuchtigkeit hat einen Einfluss auf das Temperaturempfinden des Menschen. Eine gezielte Steuerung der Raumluftfeuchtigkeit kommt jedoch praktisch nur bei mechanischer Kühlung in Frage sowie beschränkt bei der sorptionsgestützten Kühlung.

## 2.3 Interne Lasten

*Figur 2-4:*  
Typischer Tagesgang der internen Lasten bei administrativer Nutzung (220 Wh/d) [2.9]



*Tabelle 2-1:*  
Gemessene interne Lasten in 39 Bürogebäuden [2.9]. Die Werte liegen leicht höher als die SWKI-Richtwerte gemäss Tabelle 2-2.

Raumnutzung	Techn. Nutzung (Ing.-Büro)	Admin. Nutzung (Sekretariat)	Hochtechn. Nutzung (CAD)
Inst. Leistung [W/m²]	65	99	153
Max. Leistung [W/m²]	44	69	80
Gemessenes Max. [W/m²]	25	34	41
Interne Wärme [Wh/(m²·d)]	120	220	294

*Tabelle 2-2:*  
Tagessummen der internen Lasten gemäss SWKI Richtlinie 95-3. Genauere Angaben zu den Lastprofilen sind in dieser Richtlinie aufgeführt [2.3].

Raumnutzung	tiefe Last [Wh/(m²·d)]	mittlere Last [Wh/(m²·d)]	hohe Last [Wh/(m²·d)]
Einzelbüro	146	178	203
Gruppenbüro	171	196	228
Grossraumbüro	173	200	227
Sitzungszimmer		225	
Schalterhalle		215	
Einfacher Laden (non food)		165	
Lebensmittelladen		219	
Grosser Laden (non food)		261	
Grosser Lebensmittelladen		153	
Einkaufszentrum		338	
Schulzimmer		189	
Auditorium		720	
Kantine		205	
Restaurant		263	
Restaurantküche	1'332	2'520	
Spitalzimmer		140	
Hotelzimmer		153	
Lager / Archiv		0	

Ohne interne Lasten müsste in der Schweiz kein zweckmässig gebautes Gebäude gekühlt werden. Die Temperaturen erreichen im Tagesmittel kaum je mehr als 24 °C. Dies gilt grundsätzlich auch, wenn die internen Lasten sehr niedrig sind. Die beste Übersicht über einzusetzende interne Lasten bietet die SWKI-Richtlinie 95-3 "Jährlicher Energiebedarf von lüftungstechnischen Anlagen" [2.3]. Für jede der in der Richtlinie aufgeführten Nutzungen (vgl. Tabelle 2-2) werden die vorhandenen Wärmelasten und deren Zeitabhängigkeit detailliert ausgewiesen. Die Werte stimmen recht gut mit den an Bürogebäuden durchgeföhrten Messungen [2.9] der realen Lasten überein (Figur 2-4).

Die wichtigsten Angaben aus der SWKI-Richtlinie 95-3 sind zusammen mit wichtigen Hinweisen im BFE-Merkblatt "Arbeitshilfe zum Bedarfsnachweis Kühlung und Befeuchtung" [2.4] zusammengefasst.

Obwohl der Temperaturverlauf in einem Raum praktisch nur mit einem dynamisch rechnenden Simulationsprogramm bestimmt werden kann, können bei normal massiver Bauweise auch einfache Methoden angewendet werden. Die Wärmegewinne müssen, wenn sie nicht extrem sind, nicht zeitgleich abgeführt werden. In der Regel genügt es, wenn die am Tag anfallende Wärme über die folgende Nacht wieder abgegeben wird. Dadurch wird ein Aufschaukeln der Raumtemperatur vermieden. Der Temperaturausgleich am Tag erfolgt durch die Speichermasse des Gebäudes. Die relevante Grösse für kleinere und mittlere interne Lasten heisst deshalb nicht Watt, sondern Wattstunden/Tag resp. Wh/(m²·d). Nur bei grossen Lasten (> 200 Wh/m²·d), leichter Bauweise oder genau einzuhaltenden Klimaanforderungen ist eine genauere Berechnung des Raumtemperaturverlaufs notwendig.

### Abwärme von Arbeitshilfen

Während der warmen Jahreszeit stellen die elektronischen Arbeitsmittel in der Regel die bedeutendste interne Last dar. Die Beleuchtung, welche unter Umständen eine grössere installierte Leistung aufweist, kann durch Tageslichtnutzung gering gehalten werden.

Obwohl die elektrische Leistungsaufnahme der meisten EDV- und Bürogeräte in den letzten Jahren massiv reduziert wurde, hat die dem Raum zugeführte Wärmelast in der Regel eher zu- als abgenommen. Einerseits hat sich die Gerätedichte erhöht, andererseits hat auch die tägliche Betriebsdauer zugenommen. Die Vernetzung der EDV und der Umfang der installierten Programme haben dazu geführt, dass EDV-Systeme praktisch den ganzen Tag in Betrieb sind. Eine bedeutende Reduktion des Stromverbrauchs ist nur langfristig zu erwarten.

Überall wo infolge einer grossen Installationsdichte grosse Wärmelasten anfallen, werden sie am effizientesten direkt bei der Quelle abgeführt. Kühlsysteme welche direkt die Wärme von Bürogeräten abführen und mit denen ebenfalls sehr gute Erfahrungen gemacht werden, sind jedoch noch wenig verbreitet und müssen oft individuell angefertigt werden (vgl. Kap. 9).

Die Beleuchtung kann, aber muss nicht zu grossen Wärmelasten führen. Vor allem wenn die Abwärme direkt über das Lampengehäuse abgeführt wird (bis zu 75 %), kann eine künstliche Beleuchtung eine zumindest energetisch gesehene, gute Alternative zum Tageslicht darstellen (siehe auch Tageslicht).

Entscheidend ist vor allem, dass die künstliche Beleuchtung auch wirklich bedarfabhängig eingeschaltet wird und nicht einfach den ganzen Tag brennt. Entsprechende Sensoren, die zwischen Kunst- und Tageslicht unterscheiden und auch verschiedene Zonen regeln können sind auf dem Markt.

Moderne Bürobeleuchtungen sind mit einer installierten Leistung von  $10 \text{ W/m}^2$  und einer Beleuchtungsstärke von 300 bis 400 Lux realisierbar. Voraussetzung sind möglichst direkt leuchtende Leuchtstofflampen in hellen Räumen. Zur Verbesserung der Lichtqualität kann auch eine teilweise (ca. 1/3) indirekte Lichtabgabe über die Decke erfolgen. Dies führt jedoch bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke immer zu einer leichten Erhöhung der zu installierenden Leistung.

### Konvektive und strahlungsgebundene Lasten

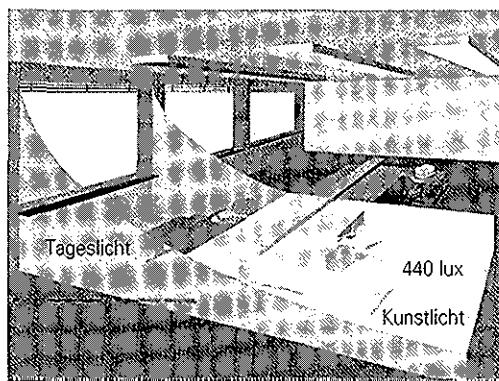
Es wird zwischen konvektiven und strahlungsgebundenen Wärmegegewinnen unterschieden. Die konvektiven Wärmelasten treten lokal auf und führen zu einem stärkeren, direkten Temperaturanstieg im Raum. Die strahlungsgebundene Wärme verteilt sich besser auf die Speichermasse und erwärmt den Raum kurzfristig weniger.

Normalerweise wird von einem Verhältnis von konvektiver zu strahlungsgebundener Wärme von 55 % / 45 % ausgegangen. Eine genaue Berücksichtigung dieses Phänomens ist praktisch nur mit dynamischen Simulationen möglich.

Gerät	aktiv	standby	aus
PC	60 W	10 W	5 W
Bildschirm	90 W	5 W	-
PC mit Bildschirm	150 W	15 W	5 W
Laserdrucker	190 W	2 W	1 W
Tintenstrahldrucker	20 W	2 W	1 W
Laser-Fax	80 W	2 W	-
Übrige Fax	20 W	2 W	-
Kopierer	1100 W	27 W	1 W
+3.23 W-Kop./Min.			

**Tabelle 2-3:**  
Typische Werte für Wärmelasten von Bürogeräten gemäss [2.4]

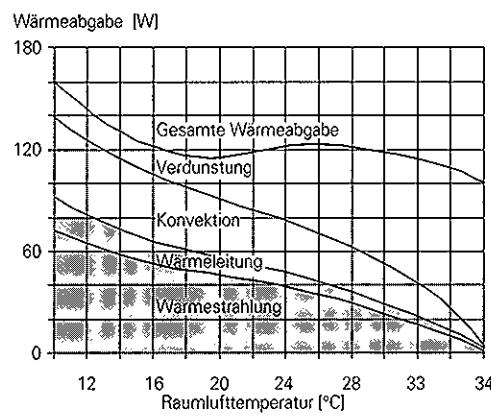
### Abwärme der Beleuchtung



**Figur 2-5:**  
Moderne Lichtregelungen verbinden Präsenzmelder und Tageslichtsensoren. Sie unterscheiden zwischen Tages- und Kunstlicht um eine Selbstbeeinflussung zu vermeiden. Bei Bedarf können auch zwei Bereiche (z.B. fensternaher und rückwärtiger Bereich) mit dem selben Sensor geregelt werden

## Abwärme von Personen

*Figur 2-6:  
Wärmeabgabe des Menschen. Für die Kühllast wird nur der sensible Anteil berücksichtigt. Der latente Anteil (Verdunstung) ist in der Regel zu gering, um das Raumklima zu beeinflussen.*



Die Personenabwärme darf bei der Bestimmung der internen Lasten nicht vernachlässigt werden. Im Einzelraumbüro müssen bspw. 5 W/m<sup>2</sup> über max. 9 Std. und im Grossraumbüro 7 W/m<sup>2</sup> über durchschnittlich 6 Std. eingesetzt werden. Damit tragen die Personen mehr als 1/5 zur gesamten Wärmelast eines mittleren Büros bei.

In Sitzungszimmern, Klassenzimmern, Restaurants etc. ist der Anteil der Personenabwärme noch wesentlich grösser. Hier beträgt er oft die Hälfte bis  $\frac{2}{3}$  der gesamten Wärmelast.

Die latente Wärmeabgabe durch Verdunstung wird für die Raumlast normalerweise nicht berücksichtigt, da sie zu keiner spürbaren Temperaturhöhung führt. Sie ist jedoch bei der Kühlleistung und besonders wenn Systeme mit Verdunstungskühlung eingesetzt werden zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 5). Die erhöhte Raumluftfeuchtigkeit reduziert das Potential der Verdunstungskühlung.

## 2.4 Externe Lasten

Die externen Lasten können nach der Handmethode gemäss *Empfehlung SIA 382/2, Ziffer 7* bestimmt werden. Sie setzen sich in der Regel in folgender Reihenfolge zusammen:

- Solargewinne durch transparente Bauteile,
- Transmission durch Außenwände, Fenster und Dächer,
- Lüftungswärmegewinne

Die direkte Sonneneinstrahlung und die Diffusstrahlung bergen das grösste Wärmelast-Potential. Die Fenstergrössen, die Orientierung und die Beschattung sind ausschlaggebend für die effektiv auftretende Wärmelast. Neben der Südseite ist die Globalstrahlung auch auf Ost- und Westfenster im Hochsommer sehr intensiv (Figur 2-8).

Wärmelasten durch Ost-Fenster sollten speziell beachtet werden. Schon von frühem Morgen an sind diese Fenster stark besonnt. Die Globalstrahlung Ost erreicht um 10 Uhr ihr Maximum, im August bis  $700 \text{ W/m}^2$ . Am Morgen, zum Teil noch vor Arbeitsbeginn, sollte eine geeignete Beschattung gewährleistet sein; andernfalls wird die Innentemperatur schon in den ersten Stunden um einige Grad erhöht und wirkt sich noch auf den ganzen Tag aus.

Die maximale Globalstrahlung auf Süd- und Westfenster fällt mit den höchsten Außen- und Innentemperaturen zusammen. Daher werden manuell bedienbare Beschattungen an diesen Fassaden eher bedient. Die wichtigste Voraussetzung zum Schutz vor sommerlicher Überhitzung sind massvolle Fensterflächen und eine gute Beschattung. Allerdings besteht ein Zielkonflikt mit der erwünschten passiven Solarenergienutzung im Winter. Dieser kann nur durch einen zweckmässigen Sonnenschutz gelöst werden.

Die Berechnung der Sonnenenergiegewinne erfolgt nach folgender Formel:

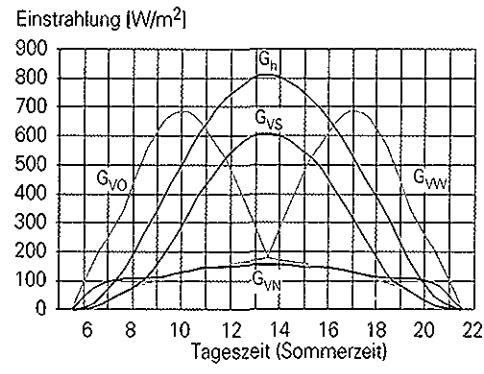
$$Q_{FS, So} = A_F \cdot f_r \cdot g \cdot \sum(s_F \cdot G_{max}) [\text{Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$$

- $Q_{FS, So}$  Solarlast  
 $A_F$  Fensterfläche  
 $f_r$  Glasanteil an Fensterfläche  
 $g$  Gesamtenergiедurchlassgrad der Verglasung inkl. Sonnenschutz  
 $s_F$  Kühllastfaktor gemäss SIA 382/2, Ziffer 733  
 $G_{max}$  Max. Globalstrahlung [ $\text{W/m}^2$ ]

*Sonnenenergiegewinne durch transparente Bauteile*

Tab. 2-4:  
Wirkung von Sonnenschutzvorrichtungen in Verbindung mit 2-fach Wärmeschutzverglasung ( $g = 60\%$ )

Sonnenschutzvorrichtung	Farbe/ Anordnung	Gesamt g-Wert
Aussenlamellenstore	hell	0.13 - 0.20
Aussenlamellenstore	dunkel	0.20 - 0.30
Gitterstoffstore	aussen	0.22 - 0.35
Innenlamellenstore	hell	0.45 - 0.55
Reflexionsgläser		0.20 - 0.55



- $G_h$  Global horizontal:  $6'850 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$   
 $G_{VO}$  Global vertikal Ost:  $4'300 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$   
 $G_{VE}$  Global vertikal West:  $4'450 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$   
 $G_{VS}$  Global vertikal Süd:  $4'390 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$   
 $G_{VN}$  Global vertikal Nord:  $1'960 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

Figur 2-7:  
Maximale Globalstrahlung auf verschiedenen orientierte Fassaden (Zürich, August). Die Unterschiede zwischen Ost-, West- und Südfasse sind relativ gering.

**Figur 2-9:**

**Einfluss der Raumgestaltung auf die Tageslichtnutzung.**

**Tageslichtkoeffizient im hinteren Raumbereich**

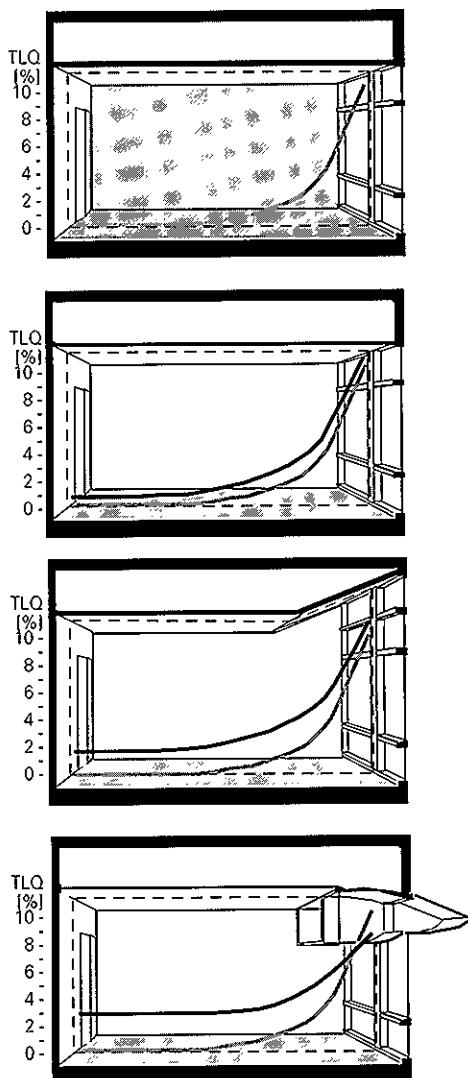
(Quelle: LESO-PB, 1995)

a) dunkle Wände 0.3 %

b) helle Wände 1 %

c) helle Wände, erhöhter Raum 2 %

d) helle Wände, Lichtlenksystem 3 %



## Tageslicht und Wärmeeinstrahlung

Ein weiterer Zielkonflikt kann zwischen der Tageslichtnutzung und der damit verbundenen solaren Einstrahlung bestehen. Tageslicht wäre an sich nicht nur die sympathischste sondern auch eine effiziente Art einen Raum zu beleuchten. Der Lichtanteil beträgt etwa 50 % an der gesamten, durch die Fenster eindringenden Sonneneinstrahlung.

Mit 1 Watt/m<sup>2</sup> Sonneneinstrahlung kann eine Beleuchtungsstärke von 115 Lux erreicht werden. Bei den heute weit verbreiteten Leuchtmittelsternen beträgt die Lichteinsparung nur etwa 20 %. Für ca. 50 Lux muss 1 Watt/m<sup>2</sup> Leistungsaufnahme in Kauf genommen werden.

Leider erreicht man mit Tageslicht jedoch nur eine sehr ungleiche Raumausleuchtung. In Fensternähe kann der Tageslichtquotient über 10 % liegen, währenddem er 4 m tief im Raum bereits weniger als 2 % beträgt. Das Resultat ist eine möglicherweise sehr reizvolle, aber auch sehr unregelmäßige Ausleuchtung des Raumes. Um auch im hinteren Teil genügend Tageslicht zu haben, muss im Fensterbereich eine rund 10-fache Beleuchtungsstärke in Kauf genommen werden. Diese führt jedoch wiederum zu Wärmebelastungen, die grösser sind, als bei künstlicher Beleuchtung.

Als einfache Richtlinie kann angenommen werden, dass bei einseitiger Befensterung nur Arbeitsplätze bis 3 m vom Fenster weg aus energetischer Sicht, besser mit Tageslicht beleuchtet werden. Aber auch hier muss die Sonneneinstrahlung mit einem geeigneten Sonnenschutz reguliert werden können. Tiefer gelegene Arbeitsplätze werden, wohlvermerkt nur im Kühlfall, besser künstlich beleuchtet.

## Wahl des Sonnenschutzes

Unbestritten am vielseitigsten einsetzbar sind Lammellenstoren, die je nach Lichteinfall verstellt werden können. Sie eignen sich speziell für Ost- und West-Fassaden mit tiefen Einstrahlwinkeln, aber auch für Südfassaden. Neuere Produkte weisen speziell Reflexionseigenschaften auf, welche auch eine teilweise Lichtumlenkung zur Decke und damit eine verbesserte Tageslichtnutzung ermöglichen.

Wieder sehr beliebt sind Stoffstoren, meist austellbar, um auf der Südseite eine Beschattung mit gleichzeitiger Sicht ins Freie zu erlauben. Problematisch bei diesen Storen ist häufig die Farbgebung, da weiße oder sonst sehr helle Storen Blendungen

verursachen. Gut bewähren sich malgelbe Storen. Braune und dunkelgrüne Stoffe verdunkeln jedoch häufig zu stark. Eher ungeeignet sind Stoffstoren für Ost- und Westfassaden. Sie eignen sich nicht um die tief stehende Sonne abzudecken.

Reflexrollen, meist in die Verglasung integriert, bieten eigentlich für alle Situationen einen guten Sonnenschutz. Vor allem bei Bildschirmarbeiten erlauben sie eine wirksame Reduktion der Blendung und Spiegelung. Mit einem Lichtdurchlassgrad von ca. 15 % schirmen sie das Sonnenlicht sehr gut ab und erlauben trotzdem die Sicht in Freie. Sie lassen sich jedoch nur relativ schlecht der momentanen Lichtsituation anpassen.

## Transmission durch Außenwände

Die Transmission durch Außenwände wird nicht berücksichtigt, da sie bei gut gedämmten Konstruktionen sehr gering ist.

$$Q_{AW} = 0$$

## Transmission durch Dächer

Die Transmissionswärmegewinne durch Dächer betragen:

$$Q_D = A \cdot k \cdot \sum \Delta t_{KL} [\text{Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$$

$A$  Fläche [ $\text{m}^2$ ]  
 $k$  Wärmedurchgangskoeffizient [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]  
 $\Delta t_{KL}$  Kühllasttemperaturdifferenz [ $\text{Kh/d}$ ]  
 27.3 für schwere Dachkonstruktionen  
 81.8 für leichte Dachkonstruktionen

### $\Delta t_{KL}$ für schweres Flachdach

Std.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Delta t_{KL}$	1.7	1.8	1.9	2.0	2.0	1.9	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.7

Std.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$\Delta t_{KL}$	0.5	0.3	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.2	1.5	1.7	

### $\Delta t_{KL}$ für Fenster

Std.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Delta t_{KL}$	-3.9	-4.4	-4.6	-5.0	-5.0	-4.9	-4.3	-3.3	-1.6	0.0	1.5	2.8

Std.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$\Delta t_{KL}$	4.0	5.0	6.0	6.1	5.7	5.0	4.0	2.7	1.0	-0.5	-2.0	-3.0

Tabelle 2-5:

Zur Ermittlung der Temperaturdifferenzen zwischen Außen- und Raumtemperatur  $\Delta t_{KL}$  wird der im Mittel heißeste Tag im August zugrunde gelegt. Dabei wird eine konstante Raumtemperatur von 26°C angenommen. Es werden für die Kühl last nur die positiven Werte berücksichtigt. (vgl. SIA V382/2 [2.1])

## Transmission durch Fenster

Die Transmissionswärmegewinne durch Fenster betragen:

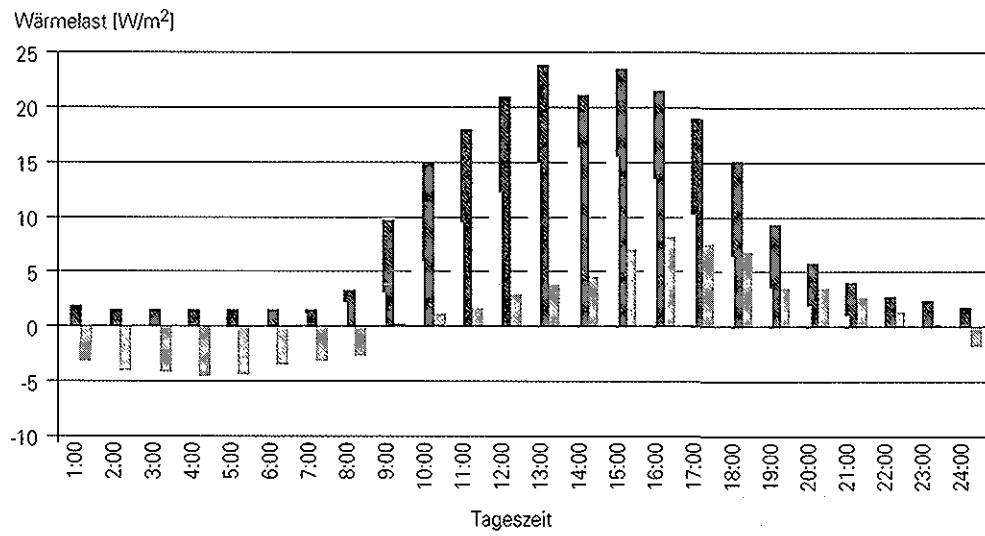
$$Q_F = A_F \cdot k_F \cdot \sum (t_a - t_i) [\text{Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$$

$A_F$  Fensterfläche [ $\text{m}^2$ ]  
 $k_F$  Wärmedurchgangskoeffizient [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]  
 $t_a$  Außenlufttemperatur [ $^\circ\text{C}$ ]  
 $t_i$  Innenlufttemperatur [ $^\circ\text{C}$ ] (in der Regel 26 °C)

Die Gesamtkühl last durch externe Lasten setzt sich aus der Einstrahlung und der Transmission durch Dächer und Fenster zusammen.

Figur 2-9 zeigt, wie sich die Anteile der externen Lasten typischerweise zusammensetzen.

## Gesamtkühl last durch externe Lasten



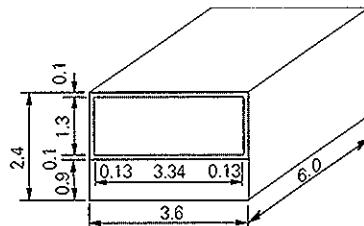
Figur 2-9:  
Typische Anteile der verschiedenen externen Wärme einträge

Sonneneinstrahlung bei g-Wert 15 %

Innere Wärmelast hoch  
 Luftwechsel, tagsüber 2-fach, nachts 4-fach

## Berechnungsbeispiel für externe Lasten

(als Grundlage dienen die Abmessungen des Raummoduls gemäss SIA V382/2 mit Orientierung Süd-Ost)



- Transmission durch Dächer:  
Annahme: Schwere Flachdachkonstruktion DA1  
 $Q_D = 0.3 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K}) \cdot 27.3 \text{ Kh/d} = 8.2 \text{ Wh/(m}^2\cdot\text{d)}$
- Transmission durch Fenster:  
Verglasung: Wärmeschutzglas Typ 3-IV-IR-IR, Aussenlamellenstoren  
 $Q_F = 5.4 \text{ m}^2 \cdot 1.5 \text{ W/(m}^2\text{K}) / 21.6 \text{ m}^2 \cdot 43.8 \text{ Kh/d} = 16.4 \text{ Wh/(m}^2\cdot\text{d)}$
- Sonneneinstrahlung durch Fenster:  
Annahme: Glastyp 3-IV-IR-IR; SE-Orientierung; schwerer Raum, Klasse 1  
 $Q_{FS,SO} = 4.32 \text{ m}^2 / 21.6 \text{ m}^2 \cdot 0.11 \cdot 1985 \text{ Wh/(m}^2\cdot\text{d)} = 43.7 \text{ Wh/(m}^2\cdot\text{d)}$
- Gesamtkühllast durch externe Lasten  
 $Q_{ext} = 8.2 + 16.4 + 43.7 = 68.3 \text{ Wh/(m}^2\cdot\text{d)}$

$$Q_{ext} = Q_D + Q_F + Q_{FS,SO} [\text{Wh/(m}^2\cdot\text{d)}]$$

In der Regel wird der Einstrahlungsgewinn die externe Kühllast dominieren (siehe Beispiel mit 65 % Anteil).

## Lüftungswärmegewinne

In der SIA-Empfehlung unberücksichtigt ist die Wärmezufuhr durch die Lüftung, da die Empfehlung zur Kühllastberechnung von einer mechanischen Lüftung ausgeht. Ist aber eine natürliche Lüftung vorgesehen, so sollte auch der Wärmeeintrag durch die Lüftung berücksichtigt werden. Im aufgeführten Beispiel würde sich bereits bei einem 1-fachen Luftwechsel ein Wärmeintrag von 33.6 Wh/(m<sup>2</sup>·d) ergeben.

$$Q_L = V_R \cdot n \cdot c_p \cdot \sum(t_a - t_i) [\text{Wh/(m}^2\cdot\text{d)}]$$

$V_R$  Raumvolumen [m<sup>3</sup>]

$n$  stündlicher Luftwechsel

$c_p$  spez. Wärmekapazität der Luft [Wh/(m<sup>3</sup>·K)]  
(0.32 Wh/(m<sup>3</sup>·K) für Mittelland)

$\sum(t_a - t_i)$  Summe stündlicher Temperaturdifferenzen

## Literaturhinweise

- [2.1] U. Steinemann et al: SIA Empfehlung V 382/2 "Kühlleistungsbedarf von Gebäuden", SIA, Ausgabe 1992 (in verlängerter Vernehmlassung), Zürich
- [2.2] U. Steinemann et al: SIA Empfehlung V 382/3 "Bedarfsermittlung für lüftungstechnische Anlagen", SIA, Ausgabe 1992 (in verlängerter Vernehmlassung), Zürich
- [2.3] SWKI Richtlinie 95-3 "Jährlicher Energiebedarf von lüftungstechnischen Anlagen", Schweiz. Verein von Wärme- und Klima-Ingenieuren, 1997, Bern
- [2.4] BFE-Merkblatt "Arbeitshilfe zum Bedarfsnachweis Kühlung und Befeuchtung", Bundesamt für Energie / Konferenz der kant. Energiefachstellen, 1997, EDMZ, 3000 Bern, Bestell-Nr. 805.163d
- [2.5] Idea Haustechnik – SIA 382/3 Bedarfsermittlung, Hochschule für Technik + Architektur Luzern, Abt. Heizung-Lüftung-Klima, Horw, Dezember 1998
- [2.6] C. Roulet et al: SIA Norm 180 Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau, SIA, Zürich 1999 (ersetzt ca. Mitte 1999 Norm 180, Ausgabe 1988)
- [2.7] Beat Nussbaumer: RAVEL-Untersuchungsprojekt 32.51: Interne Wärmelasten von Betriebseinrichtungen, Bern, März 1992
- [2.8] R. Ruch, M. Farner, Hp. Eicher: BFE-Projekt Interne Lasten für den Solarplaner – Interne Lasten in Nichtwohngebäuden; Grundlagen für den Solarplaner, Liestal, Oktober 1994
- [2.9] R. Ruch, M. Farner, Hp. Eicher: NEFF-Projekt 501: Grösse und Gleichzeitigkeit von internen Lasten in Nichtwohngebäuden, Liestal, Juni 1994
- [2.10] R. Ruch, M. Farner, Hp. Eicher: BFE-Projekt: Elektroenergieverbrauch von Bürogeräten – Detaillierte Elektrizitätsverbrauchsmessungen von Bürogeräten, Liestal, Dezember 1994

## 3. Systemwahl

Die Wahl eines Kühlsystems erfolgt primär aufgrund der benötigten Kühlleistung. Aus wirtschaftlichen Überlegungen wird man dafür das System auswählen, welches den geforderten Komfort zu möglichst geringen Kosten sicherstellt.

Mit dem nachfolgenden Entscheidungsbaum soll eine Orientierungshilfe gegeben werden, um die geeigneten Systeme bestimmen zu können. Dabei wurde versucht, für die jeweils gegebene Situation die kostengünstigste Lösung bezüglich Investitions- und Betriebskosten aufzuzeigen.

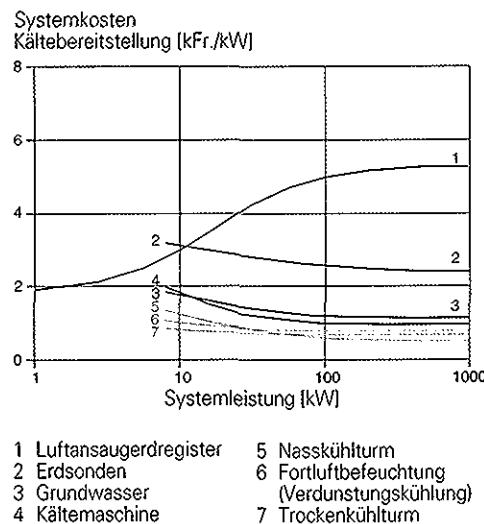
Der Entscheidungsbaum stellt natürlich eine Vereinfachung dar, von welcher die reale Situation abweichen kann. Die angegebenen Leistungen gelten primär für das schweizerische Mittelland. Die Systemkosten werden in der Regel mit der Leistungsfähigkeit der Systeme zunehmen. Im Einzelfall ist es aber auch durchaus möglich, dass aufgrund spezieller baulicher Gegebenheiten die Kosten abweichen können.

Vor allem die konventionellen Kältemaschinen können unter Umständen eine bezüglich Investitionskosten eine günstige Option darstellen. Abgesehen davon, dass sie im Gegensatz zu den passiven und hybriden Raumkühlsystemen bewilligungspflichtig sind, können sie im Betrieb teuer zu stehen kommen. Vor allem erhöht ihre ständige Verfügbarkeit das Risiko, dass sie wesentlich häufiger im Betrieb sind als eigentlich notwendig. Hinzu kommt, dass ihre unbestrittenen Leistungsfähigkeit bei Luftsystemen zu schlechtem Komfort und unter Umständen aufgrund häufiger Taupunktunterschreitungen zu schlechter Luftqualität führen kann.

Der Entscheidungsbaum soll dazu dienen, während dem Vorprojekt die verfügbaren Kühlstrategien zu evaluieren. Es ist durchaus möglich, dass mehr als eine Möglichkeit aufgrund des Entscheidungsbaumes machbar ist. Erst eine detaillierte Evaluation mit Hilfe von Systemsimula-

### Grundlagen zur Systemwahl

Die methodischen Grundlage zur Systemwahl wurden im Rahmen einer Diplomarbeit der RWTH Aachen erarbeitet [3.1]. Dabei ging es vor allem darum, Projektkriterien so zu strukturieren, dass der Planer im Rahmen eines Vorprojekts eine Vorevaluation der möglichen Kühlsysteme vornehmen kann. Die Ergebnisse sind im Entscheidungsbaum (Figur 3-3) zusammengefasst.



Figur 3-1:  
Richtwerte für Systemkosten (Kältebereitstellung ohne Wasseraufbereitung, Kälteverteilung und raumseitige Installationen). In die Gesamtkostenrechnung sind die Kosten für Kälteverteilung und Betrieb mitzuberücksichtigen. Die Angaben sind als Richtwerte für die Systemevaluierung zu verstehen und nicht für die Kostenplanung. Sie stellen Erfahrungswerte kostenmäßig erstellter Anlagen im schweizerischen Mittelland dar. Die steigenden Kosten bei grossen Luftansaugerdregistern sind durch die aufwendigeren Luftverteilanlagen und Aushubarbeiten bedingt. Die Kurven 5 bis 7 sind grau, da angegebene Kühlleistung bei ungünstigen Klimaverhältnissen nicht garantiert werden kann.

tionen und vor allem aufgrund einer situationsbedingten Kostenschätzung, kann die definitive Systemwahl ermöglichen. Sehr häufig werden auch Systemkombinationen die optimale Lösung darstellen. Passive Kühlsysteme können aber auch die Lüftung unterstützen oder teilweise im Winter zur Beheizung resp. Luftvorwärmung eingesetzt werden.

### Entscheidungsbaum

Der Entscheidungsbaum führt durch drei Entscheidungsebenen:

- bauliche Voraussetzungen und Kühllast
- verfügbare Kältesenken
- Kälteverteilung / -abgabe

Es ist sinnvoll, die baulichen Voraussetzungen als Erstes zu optimieren. Im Vordergrund steht dabei die Reduktion der Wärmelast, aber auch Trägheit des Gebäudes, welche die kurzfristige Erwärmung verhindert. Dies ist nicht nur eine Frage des Energieverbrauchs, sondern auch des Komforts. Der Komfort ist immer besser, je kleiner die benötigten Leistungen sind.

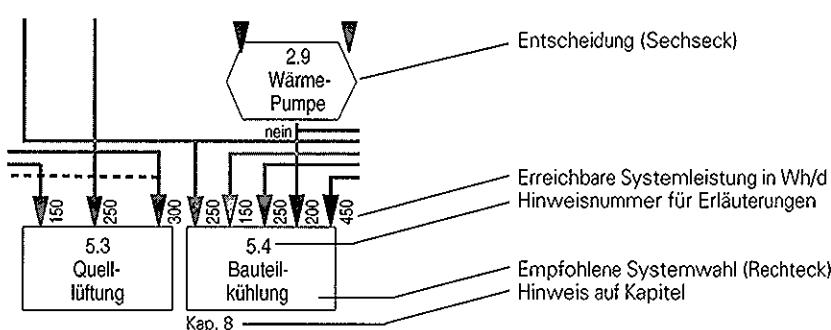
Erst bei einem optimierten Gebäude ist es sinnvoll, die geeignete Kältesenke für die Kühlung zu wählen. Hier sind es vor allem die Wirtschaftlichkeit und die örtlichen Gegebenheiten (Grundwasser, Fundamentpfahlung etc.), die zur Wahl eines Systems führen.

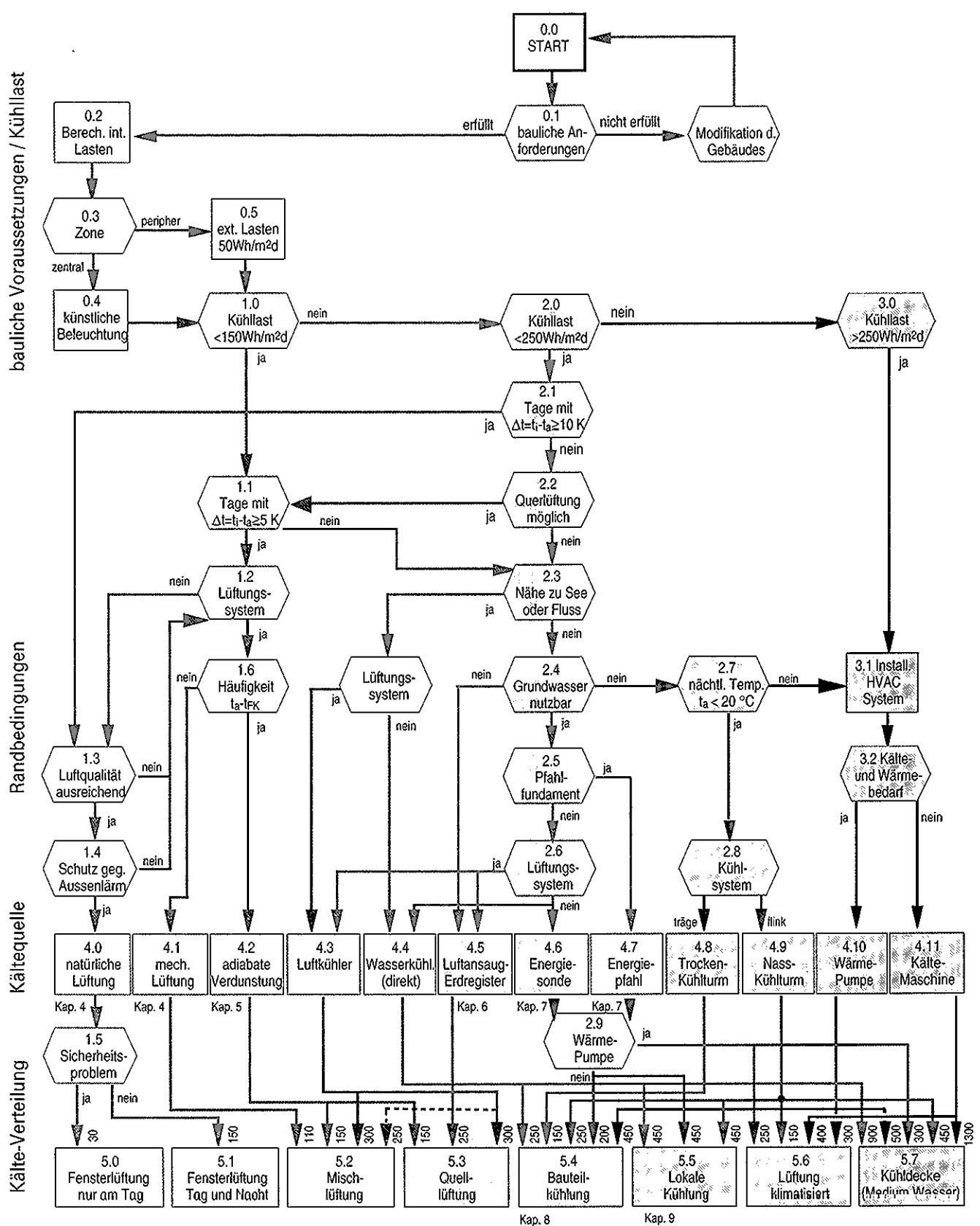
Als letztes erfolgt die Wahl des Kälteverteilungssystems. Häufig wird vor allem hier die Leistungsfähigkeit des Systems bestimmt. Entscheidend ist vor allem, ob mit Luft oder aber mit wasserführenden Systemen, dem Gebäude die Wärme entzogen wird.

Die einzelnen Schritte werden nachfolgend erläutert.

Figur 3-2:

Erläuterungen zum Entscheidungsbaum Figur 3-3





Figur 3-3: Entscheidungsbaum für die Systemwahl. Die systematische Überprüfung der Möglichkeiten soll helfen, die im Anwendungsfall bestehenden Optionen frühzeitig zu erfassen. Die am geeigneten erscheinenden Systeme sollten genauer analysiert werden.

## Hinweise zum Entscheidungsbaum

### 0.0 Start

Einstieg in den Entscheidungsbaum

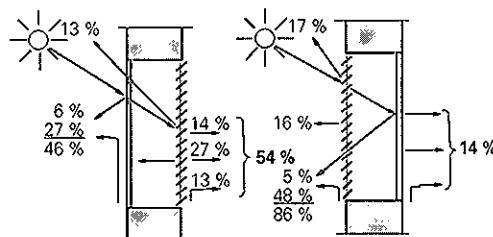
### 0.1 Bauliche Anforderungen

Es ist leicht einzusehen, dass eine Gebäudekühlung nur dann sinnvoll ist, wenn die baulichen Anforderungen bezüglich sommerlichem Wärmeschutz erfüllt werden. Die ist auch eine Voraussetzung für den Bedarfsnachweis für eine Kühlung.

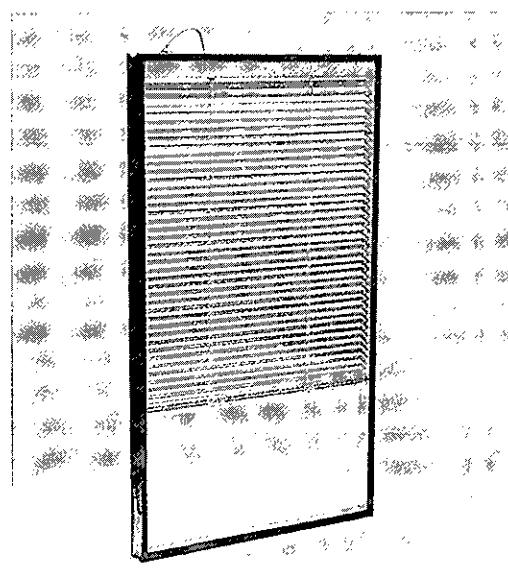
Wärmeschutz und Dichtheit der Gebäudehülle:

- Erfüllung des sommerlichen Wärmeschutzes gemäss Norm SIA 180 [3.2]
- Einhaltung der Mindestgrenzwerte nach Empfehlung SIA 380/1 [3.3]
- Dichtheit der Gebäudehülle gemäss Anhang 7 der Norm SIA 180 [3.2]

*Figur 3-4:  
Strahlungsbilanz am Fenster. Links mit innenliegende Jalousie, rechts mit aussenliegende*



*Figur 3-5:  
Spezielle lichtlenkende Jalousien im Schweissenzwi-schenraum verbessern die Tageslichtnutzung bei vermin-derten Einstrahlung (Bsp. Ve-tro Forte)*



Sonnenschutz:

- Im allgemeinen soll ein Gesamtenergiedurchlassgrad für die Sonnenstrahlung durch die Verglasung inkl. Sonnenschutz von < 15 % erreicht werden. Richtwerte typischer Kombination von Verglasung und Sonnenschutz finden sich in Ziffer 7 3 2 der Empfehlung SIA V382/2 [3.4]. Bei der Wahl der Beschriftungseinrichtung ist darauf zu achten, dass nicht nur ein guter Sonnenschutz, sondern auch eine gute Tageslichtnutzung möglich ist.
- Neben dem g-Wert kommt der Anordnung und der Art des Sonnenschutzes eine grosse Bedeutung zu. Aussenjalousien stellen den wirksamsten Sonnenschutz dar, wobei Reflexions- und Absorptionsgrad der Lamellen eine untergeordnete Rolle spielen, da der Wärmeübergang ohnehin an die Außenluft erfolgt. Die Probleme hinsichtlich Betriebssicherheit, Reparaturanfälligkeit und Geräuschbildung bei der Aussenjalousie werden durch Verwendung von Innenjalousien verhindert, jedoch ist die Wärmelastung des Raumes aufgrund der Erwärmung der Lamellen wesentlich grösser. Innenliegende Storen dienen deshalb primär dem Blendschutz. Figur 3-3 stellt die bilanzierten Fassaden einander gegenüber. Es ist auch die Integration einer Jalousie mit hohem Reflexionsgrad im Zwischenraum einer dichten Doppelscheibenanordnung möglich. Entsprechende Produkte sind auf dem Markt (Figur 3-5).

Speichermasse:

Damit bei gekühlten Räumen die Wärmespeicherfähigkeit der Baumasse ausgenutzt werden kann, ist gemäss SIA V382/2, Ziffer 5 2 mindestens eine mittelschwere Bauweise mit einer

speicherwirksamen Masse pro Raum von > 300 kg/m<sup>2</sup> anzustreben.

Praktisch bedeutet dies, dass nebst massiven Wänden (Backstein oder Gips) entweder ein massiver Boden oder eine massive Decke erforderlich ist, die in direktem Kontakt mit der Raumluft steht. Bei Leichtbauwänden sollten sowohl Decke und Boden massiv und in direktem Kontakt mit der Raumluft sein. Andernfalls ist die Austauschfläche zu klein.

#### Beleuchtung:

Es ist auf ein geeignetes Beleuchtungskonzept zu achten. Hier bietet ein tageslichtgesteuertes Konzept mit intensiver Tageslichtnutzung grosse Vorteile.

Die Nennbeleuchtungsstärken wurden gegenüber früheren Richtwerten eher reduziert. Anstelle einer einheitlichen Beleuchtung wird vermehrt eine Grundbeleuchtung gewährleistet, die bei erhöhten Anforderungen durch Arbeitsplatzleuchten ergänzt wird.

Tabelle 3-1 gibt Richtwerte für typische Anwendungen. Weitere Angaben für Nennbeleuchtungsstärken und spezifische Anschlussleistungen der Beleuchtungskörper sind in der Empfehlung SIA V382/2, Ziffer 6 2 1 [3.4] zu finden.

#### Farbgebung:

Die Farbe der Fassaden spielt eine Rolle für die Erwärmung bei Sonneneinstrahlung. Dunkle Fassaden ergeben höhere Oberflächentemperaturen und bewirken damit neben einer höheren Temperaturbeanspruchung der Fassade auch ein Eindringen von erhitzter Außenluft durch geöffnete Fenster.

#### 0.2 Berechnung der internen Lasten

Die interne Last wird nach Kapitel 2 oder SIA V382/2 [3.4] bestimmt. Dabei sollen die internen Lasten durch die Beleuchtung zunächst nicht einbezogen werden, da sie nur bei innenliegenden Zonen zu berücksichtigen sind.

#### 0.3 Zonierung

Interne Lasten durch die Beleuchtung und externe Lasten variieren in verschiedenen Gebäudebereichen. Daher ist eine Zonierung in einen Außenbereich (peripher) und in einen Innenbereich (zentral) sinnvoll.

Als peripher gilt ein 5 m breiter Bereich entlang der Fassade mit guter Tageslichtbeleuchtung. Hier wird keine künstliche Beleuchtung eingerechnet.

Raumtyp	Nennbeleuchtungs- stärke [Lux]	Spez. Anschluss- leistung [W/m <sup>2</sup> ]
Nebenräume	100	3 - 5
Restaurant	200	5 - 8
Büro	300	6 - 8
Grossraumbüro	500	10 - 15

**Tabelle 3-1:**  
Richtwerte für Nennbeleuchtungsstärken und spezifische Anschlussleistungen energiesparender Beleuchtungskonzepte (inkl. Vorschaltgeräte, Alterungseinfluss) (Quelle [3.4])

Die zentralen Zonen – weiter als 5 m von der Fassade entfernt – müssen auch im Sommer zur Tageszeit künstlich beleuchtet werden. Hier wird die Wärmelast der Beleuchtung eingerechnet.

#### 0.4 Zentrale Zonen

Als beleuchtungsbedingte Kühllast kann 80 bis 120 Wh/(m<sup>2</sup>·d) angenommen werden. Für detaillierte Werte siehe SWKI Richtlinie 95-3 [3.6] entnommen werden.

#### 0.5 Peripherie Zonen

Die externen Lasten errechnen sich nach Kapitel 2.4 oder mit der ausführlichen Handmethode gemäss Empfehlung SIA 382/2, Ziffer 7 [3.4]. Die Rechnung basiert auf extremen Annahmen, so dass der errechnete Wert einen Spitzenwert darstellt. Erfahrungen haben gezeigt, dass mit 50 Wh/(m<sup>2</sup>·d) die externen Lasten in der Regel realistisch angenommen sind.

#### 1.0 Geringe Kühllast

Die ermittelten Werte für externe und interne Lasten sind aufzuaddieren. Ergeben sich weniger als 150 Wh/(m<sup>2</sup>·d), so besteht eine geringe Wärmelast, die in der Regel durch ein geeignetes Lüftungskonzept zu bewältigen ist.

#### 1.1 Nächtliche Abkühlung

Damit mit Nachtlüftung wirksam gekühlt werden kann, sollte die Nachttemperatur während mindestens 5 Std. unter 21 °C liegen (Raumtemperatur von 26 °C mindestens um 5 K während einer Dauer von wenigstens 6 h/d unterschritten). Wie Figur 3-6 zeigt, ist dies während des Schweizer Sommers im Mittelland nahezu immer möglich.

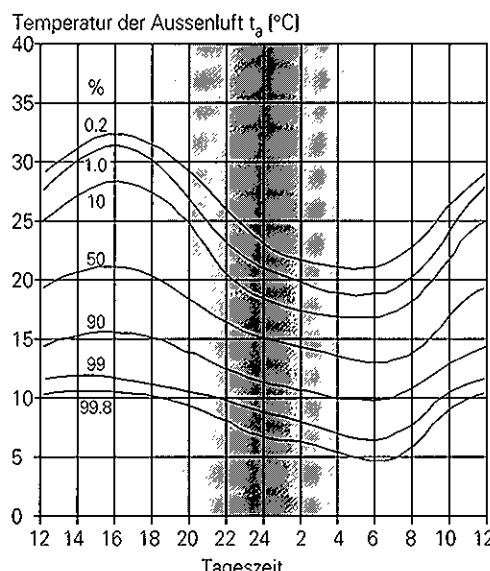
#### 1.2 Lüftungsoptionen

Mit einem mechanischen Lüftungssystem können Kühllasten gezielter als mit natürlicher Lüftung abgeführt werden. Bezüglich Luftwechsel sind jedoch auch Grenzen gesetzt. Eine Nachtauskühlung mit hohen Luftwechseln kann zwar zu einer guten Auskühlung führen, die Ventilationskosten (Hilfsenergieaufwand) werden diesen Vorteil jedoch schnell wieder in Frage stellen. 2- bis 4-fache Luftwechsel sind noch vertretbar (vgl. Kapitel 4).

#### 1.3 Außenluftqualität

Bei ungenügender Außenluftqualität – vor allem an stark befahrenen Strassenzügen – kann mittels mechanischer Lüftung eine wesentliche Verbesserung erzielt werden. Einerseits kann der Luftansaug an den Ort mit bestmöglichster (und möglichst kühler) Außenluft plaziert werden, andererseits ist mittels Filtertechnik eine weitere Verbesserung der Luftqualität möglich. Insbesondere kann damit die Luft von Pollen und Feinstaub befreit werden.

*Figur 3-6:  
Häufigkeit der Tagesgänge  
der Außentemperatur im  
Monat August (Zürich-Flughafen [3.7], Nachtzeit grau hin-  
terlegt)*



## 1.4 Aussenlärm

Ähnliches wie bei der Qualität der Außenluft gilt beim Schutz vor Außenlärm. An lärmigen Lagen kann mit einer mechanischen Lüftung das Gebäude auch bei geschlossenen Fenstern mit genügend Außenluft versorgt werden.

## 1.5 Sicherheitsaspekte

Die passive Lüftung ist eine Fensterlüftung. Insbesondere Bürogebäude unterliegen höheren Anforderungen hinsichtlich Diebstahl- und Einbruchsicherheit, aber auch bezüglich Witterungseinflüssen. Diese Anforderungen verhindern oft die günstige passive Nachtlüftung, sowohl als alleiniges Kühlverfahren, als auch als unterstützendes.

Falls die natürliche Lüftung eine erwünschte Option darstellt, ist diesem Sachverhalt architektonisch und gebäudetechnisch Aufmerksamkeit zu widmen.

## 1.6 Verdunstungskühlung

Ob eine Verdunstungskühlung (siehe Kapitel 5) sinnvoll ist, hängt im Wesentlichen von der relativen Feuchte der warmen Außenluft ab. Das Kühlpotential wird durch die Differenz zwischen trockener und der dazugehörigen Feuchtkugeltemperatur bestimmt.

Eine adiabatische Kühlung ist vor allem dann sinnvoll, wenn sich die Außenbedingungen durch niedrige Luftfeuchtigkeiten bei hohen Außentemperaturen auszeichnen. Die direkte Befeuchtung der Zuluft ist in Mitteleuropa selten sinnvoll. Die indirekte Kühlung der Abluft ist dann möglich, wenn die Luft den Raum (bei ca. 26 °C) relativ trocken verlässt. Als Richtwert kann angenommen werden, dass der Unterschied zwischen Außentemperatur  $t_a$  und Feuchtkugeltemperatur  $t_{FK}$  an einem typischen Tag mindestens 60 K betragen sollte.

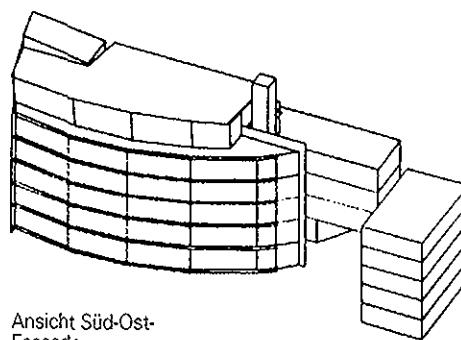
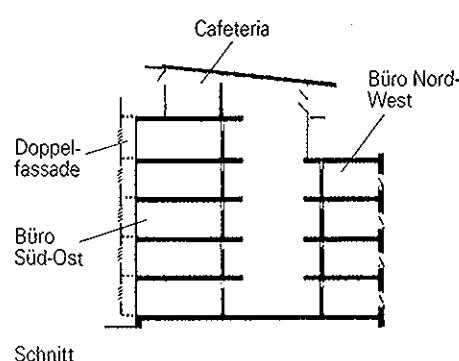
Die Verdunstungskühlung genügt im Normalfall nicht, um die Kühlung eines Gebäudes sicherzustellen. Sie ist jedoch geeignet, tagsüber auch an heißen Tagen die Zuluft auf Komfortniveau abzukühlen.

## 2.0 Mittlere Kühllast

Wärmelasten zwischen 150 und 250 Wh/(m<sup>2</sup>·d) erfordern bereits besondere Massnahmen zur Vermeidung der Übererwärmung. In diesem Bereich stehen hybride Kühlsysteme im Vordergrund.

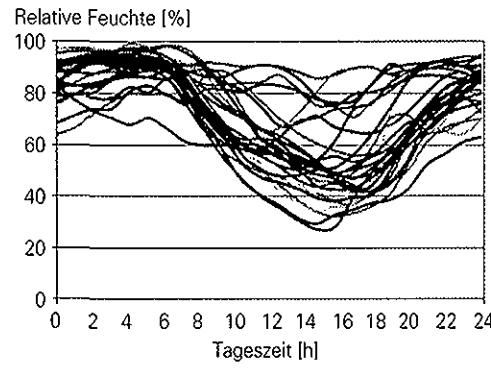
## 2.1 Kalte Nächte

Fällt die Nachttemperatur unter 16 °C, was bei Gebäudestandorten auf etwa 800 m ü.M. häufig der Fall ist, so können auch noch Wärmelasten



Ansicht Süd-Ost-Fassade

Figur 3-7:  
Kühlen mit natürlicher Nachtlüftung erfordert oft ein entsprechendes architektonisches Konzept. Beispiel Neubau kant. Verwaltung Morges (Architekt R. Lüscher, Ingenieure Sorane SA)



Figur 3-8:  
Bandbreite der Schwankungen von relativer Feuchte und Außenlufttemperatur. Eine Linie entspricht einem Tagesgang (Zürich-Flughafen, August, Design Year)

bis zu 250 Wh/(m<sup>2</sup>·d) über die natürliche oder mechanische Lüftung abgeführt werden.

## 2.2 Querlüftung

Auch dort, wo problemlos die natürliche Nachtluftung als Querlüftung realisiert werden kann, können höhere Wärmelasten abgeführt werden. Dies bedingt allerdings, dass auch eine grosse, auskühlbare Gebäudespeichermasse vorhanden ist.

Dieses Konzept kann eine sehr gute Kühlleistung ergeben. Es ist jedoch stark benutzerabhängig und schlecht kontrollierbar. Es funktioniert nicht im selben Masse bei Windstille. Zudem ist eine zu starke Unterkühlung der Räume am Morgen möglich.

## 2.3 Nähe zu Gewässern

Natürlicher Kältereservoirs in Flüssen und Seen wären optimal. Nur in wenigen Fällen wird man sich jedoch dieser Kältequellen bedienen können. Die Anzapfmöglichkeiten müssen optimal sein (kurze Leitungen, genügend grosser Kältebedarf, Nutzungsmöglichkeit auch im Winter). Zudem ist eine Bewilligung des Gewässerschutzamtes notwendig.

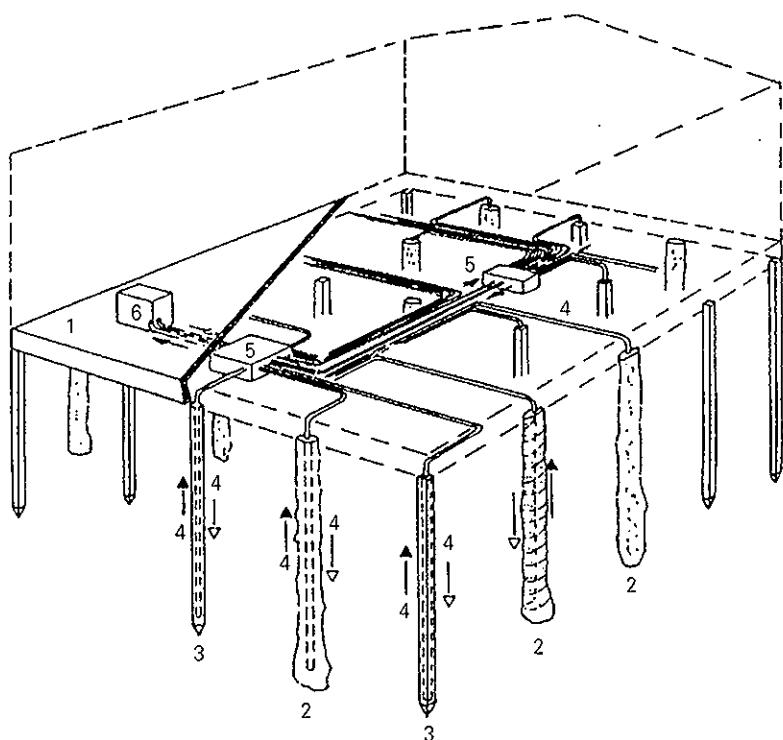
## 2.4 Grundwasser

Die Grundwassernutzung kann über ein offenes oder ein geschlossenes System erfolgen. In beiden Fällen ist Nutzung im Sommer und im Winter anzustreben.

Offene Systeme sind vergleichbar mit Gewässern, mit einer Entnahm- und einer Rückspeisungsstelle. Sofern eine Bewilligung vorliegt, stellt dieses System oft eine kostengünstige, effiziente Lösung dar.

Geschlossene Systeme sind Erdsonden oder Luftansaug-Erdregister. Entscheidend ist hier, wie schnell das Grundwasser fliesst. Bei Fliessgeschwindigkeiten von ca. 50 cm und mehr pro Tag bestehen sehr günstige Bedingungen zur Kälte- oder Wärmegewinnung. Die thermische Regeneration des Erdreichs ist laufend gewährleistet.

In der Regel wird man jedoch nahezu stationäres Grundwasser antreffen. In diesem Fall dient das Erdreich primär als saisonaler Wärmespeicher, der, um stabile Verhältnisse zu gewährleisten, wieder regeneriert werden muss. Durch das Grundwasser werden die thermischen Eigenschaften des Erdreichspeicher etwas verbessert. Leistung und Kapazität nehmen gegenüber trockenem Erdreich etwa 20 bis 30 % zu.



Figur 3-9:

Pfahlfundationen können zum Verlegen von Energiesonden genutzt werden. Schematische Darstellung einer Energiepfahl-anlage mit verschiedenen Pfahltypen:  
 1 Bodenplatte  
 2 Ortsbetonpfeil  
 3 Fertigbetonpfeil  
 4 Wärme- / Kältekreislauf  
 5 Verteilerkasten  
 6 Wärmepumpe

## 2.5 Pfahlfundation

Ob eine Pfahlfundation vorhanden ist oder nicht, ist ein baukonstruktiver Entscheid, abhängig von Bodenbeschaffenheit, Nachbarbebauung, Bodenfestigkeit und Grundwasser. Das Verlegen von Energiesonden in Pfahlfundamenten ist eine relativ günstige Lösung, da keine speziellen Bohrungen ausgeführt werden müssen (vgl. Kap. 7).

## 2.6 Mechanische Lüftung

Hier muss nochmals entschieden werden, ob die Kühlung über das Lüftungssystem oder Bauteile erfolgen soll. Denkbar und oft auch sinnvoll sind aber auch Kombinationen der beiden Möglichkeiten.

## 2.7 Nachttemperatur

Bei nächtlichen Außentemperaturen unter 20 °C können erhöhte Wärmelasten auch über Kühltürme gezielt abgeführt werden. Diese Lösung bietet sich vor allem dort an, wo infolge der thermischen Gebäudeträgheit, die Wärmelasten zeitverzögert abgegeben werden können.

Der Trocken-, als auch der Nasskühlturn dient der Aufbereitung von Kaltwasser. Ein Trockenkühlturn ist in Anschaffung und Betrieb einiges günstiger als ein Nasskühlturn. Er kann deshalb grösser dimensioniert werden und erreicht dadurch ähnlich gute Leistungen wie der Nasskühlturn. Er ist auch hygienisch unbedenklich.

Nasskühlturne werden deshalb vor allem dort eingesetzt, wo flinke Kühlsysteme auch Kühlleistung tagsüber erfordern. Träge Systeme, welche auch nachts die Wärme abführen können, werden vorteilhafterweise mit Trockenkühlturnen ausgerüstet. Die Dimensionierung erfolgt nach Herstellerangaben.

## 3.0 Hohe Küllast

Wärmelasten von mehr als 250 Wh/(m<sup>2</sup>·d) sind relativ hoch. Sie erfordern in der Regel den Einsatz von Kältemaschinen. Nebst Wärmelast pro Tag müssen auch die stündlichen Lastspitzen berücksichtigt werden. Dies erfordert in der Regel detaillierte Systemsimulationen.

## 3.1 Mechanische Kühlung

In der Empfehlung SIA 382/3, Ziffer 5.24 [3.5] wird eine konventionelle Kühlung mit den nachfolgenden Grenzwerten als gegeben angenommen:

- Innenräume und Räume deren Fenster aus Immissions- und/oder Sicherheitsgründen nicht geöffnet werden können:  
350 Wh/(m<sup>2</sup>·24h) resp. 250 Wh/(m<sup>2</sup>·12h)
- Räume in denen Fensterlüftung möglich ist:  
450 Wh/(m<sup>2</sup>·24h) resp. 350 Wh/(m<sup>2</sup>·12h)

Im Entscheidungsbaum eine konventionelle Kühlung schon ab 250 Wh/(m<sup>2</sup>·d) angesetzt. Der Grund liegt darin, dass optimal ausgelegte Kälteanlagen aus gesamtökologischer und -ökonomischer Sicht mit alternativen/passiven Verfahren konkurrieren können, da ab einer gewissen Kühlleistung passive Methoden ebenfalls einen nicht zu vernachlässigenden apparativen Aufwand mit sich bringen.

## 3.2 Kombinierter Kälte- und Wärmebedarf

Es ist durchaus möglich, dass in einem Gebäude ein gleichzeitiger Bedarf an Wärme und Kälte vorliegt. Je nach Gebäudenutzung und Ausstattung wird z.B. Wärme für das Brauchwasser benötigt. Andererseits kann z.B. die Westseite durchaus noch zu kühl sein, während sie Ostseite sich bei Sonnenaufgang sehr schnell überhitzt.

Die kombinierte Nutzung von Wärme und Kälte mittels Wärmepumpe gilt als energieeffiziente, nicht bewilligungspflichtige Technik.

## 4.0 Natürliche Lüftung

Normalerweise ist im Bürogebäude eine natürliche Lüftung nur in den Morgenstunden (7.00 bis 11.00 Uhr) möglich. Bei geeigneten baulichen Massnahmen (z.B. Jalousien) kann auch nachts ein gewisser Luftaustausch möglich. Tagsüber sollte nur die Grundlüftung zu Sicherstellung der Luftqualität gewährleistet werden. Genauere Angaben sind in Kapitel 4 zu finden.

## 4.1 Mechanische Lüftung

Die mechanische Nachtlüftung beruht auf dem gleichen Prinzip, wie die passive bzw. natürliche Nachtlüftung. Lediglich der gezielte Luftwechsel führt zu einer besser kontrollierbaren Auskühlung. Erfahrungen haben gezeigt, dass bedingt durch die steigenden Kosten (Material, Antriebsenergie) es keinen Sinn macht mit Luftwechseln von > 4 zu fahren. Die Kombination mit adiabatischer Kühlung oder einem Luftansaug-Erdregler kann interessant sein (weitere Angaben siehe Kap. 4, 5 und 6).

## 4.2 Adiabatische Kühlung

Die Verdunstungskühlung kann tagsüber eine kühtere Zulufttemperatur gewährleisten. Sie ermöglicht auch die knappere Dimensionierung von Kälteanlagen, sie wird sie jedoch nicht ersetzen können. Die mögliche Kühlleistung ist deshalb im monovalenten Betrieb nicht wesentlich höher als bei der mechanischen Lüftung ohne Befeuchtung (vgl. Kap. 5).

## 4.3 Luftkühler

Falls Kühlwasser unter 20 °C verfügbar ist, kann die Zuluft vor allem tagsüber über Luftkühler abgekühlt werden.

## 4.4 Wasserkühlung

Die direkte Kühlung der Gebäudemasse stellt eine weitere Möglichkeit dar, Kühlwasser, das beinahe 20 °C aufweist zu nutzen. Die Kühlleistung ist allerdings eher geringer als beim Luftkühler, da die Gebäudemasse die Wärme nicht nur speichert sondern einen zusätzlichen Übergangswiderstand aufweist.

Hingegen ist eine Kombination von mechanischer Lüftung und Bauteilkühlung geeignet, um die Leistungsfähigkeit zu erhöhen.

## 4.5 Luftansaug-Erdregister

Sie sind vor allem interessant, um im Winter die Zuluft zu erwärmen und im Sommer zu kühlen. Es ergeben sich interessante Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Systemen, insbesondere mit Quellluftsystemen, da die Zulufttemperatur selbstregelnd praktisch immer etwas unter der Raumlufttemperatur liegen wird.

Genauere Angaben sind in Kapitel 6 zu finden.

## 4.6 Energiesonden

Mit den stark gefallenen Kosten von Bohrungen sind die bis zu 100 m tief ins Erdreich dringenden Erdsonden populär geworden. Besonders interessant sind auch hier kombinierte Anwendungen zum Kühlen und Heizen. Die Kühlung erfolgt normalerweise direkt über den geschlossenen Kreislauf, wogegen zum Heizen häufig auch Wärmepumpen eingesetzt werden.

Bei einzelnen Ersonden ist der Ausgleich von Wärmebezug und Wärmeabgabe nicht besonders kritisch. Die Masse des involvierten Erdreiches ist zu riesig um dessen Temperatur nachhaltig zu verändern. Dagegen muss bei Ersondenfeldern auf einen guten Ausgleich geachtet werden, um bspw. eine langsame Erwärmung zu vermeiden (vgl. Kap. 7).

## 4.7 Energiepfähle

Sie sind vergleichbar mit Ersonden. Da jedoch die Pfähle primär der Fundation dienen, ist der Wärmebezug im Winter limitiert. Die Fundation darf nicht gefrieren. Ein weiterer Unterschied ergibt sich im Sommer. Durch das darüberliegende Gebäude kann sich das Erdreich erwärmen, was die Kühlleistung der Anlage reduzieren würde (weitere Angaben in Kap. 7).

## 4.8 Trockenkülturm

Trockenkültürme sind vor allem zweckmäßig in Kombination mit der Bauteilkühlung, da diese in der Lage ist, Wärmelasten tagsüber zu speichern und zeitverzögert wieder abzugeben. Dazu kann der Trockenkülturm die kühlen Nachttemperaturen ideal nutzen (vgl. Kap. 8).

## 4.9 Nasskülturm

Im Gegensatz zum Trockenkülturm nutzen Nasskültürme den Effekt der Verdunstungskühlung. Dieser ist vor allem tagsüber gross, wenn die Außenluft relativ trocken ist. Nachts, bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit ist die Wirkung geringer. Nasskültürme sind deshalb dort interessant, wo auch tagsüber ein Kühlbedarf gedeckt werden muss.

Durch den offenen Wasserkreislauf sind die apparativen Aufwendungen, der Anteil der Hilfsenergie für Pumpen und der notwendige Unterhalt zur Vermeidung bakterieller Belastungen wesentlich höher als bei Trockenkültürmen.

## 4.10 Wärmepumpe

Kleine Wärmepumpen, welche dem Gebäude Wärme entziehen und mindestens teilweise diese Wärme auf höherem Temperaturniveau für andere Anwendungen (z.B. Warmwasser) bereitstellen, können sowohl finanziell wie auch energetisch äusserst interessant sein. Anlagen mit einem Energieverbrauch von weniger als 5 W/m<sup>2</sup> (10 W/m<sup>2</sup> bei Sanierungen) werden deshalb behördlich in der Regel ohne weitere Bedingungen akzeptiert.

## 4.11 Kältemaschine

Die konventionelle, gut ausgelegte Kältemaschine wird es bei grossen Leistungen auch in Zukunft noch brauchen. Die Problematik liegt weniger bei der Kältemaschine selbst, sondern in der Regel in der grossen, verfügbaren Kälteleistung, welche bisher häufig zur missbräuchlichen Nutzung und nicht optimierten Gesamtkonzepten geführt hat.

## 5.0 Fensterlüftung nur am Tag

Die natürliche Lüftung nur während der kühlen Morgenstunden erlaubt nur eine bescheidene Kühlung. Ab ca. 11.00 Uhr ist die Außenluft an warmen Tagen bereits zu warm und die Fenster werden besser geschlossen. An besonnten Ostfassaden kann an warmen Tagen praktisch überhaupt nicht gelüftet werden. Allein der Durchzug bringt noch eine gewisse Kühlung. Diese ist allerdings trügerisch, da in Wirklichkeit die warme Luft die Räume zusätzlich erwärmt.

## 5.1 Fensterlüftung Tag und Nacht

Wenn auch nachts gelüftet werden kann, ist die natürliche Lüftung meistens recht wirksam, da sie grosse Luftwechsel erlaubt. Sie bedingt aber eine genügende Speichermasse, damit während der warmen Nachmittagsstunden auf eine Lüftung verzichtet werden kann.

## 5.2 Mischlüftung

Bei der Mischlüftung wird die Raumluft durch

Mischen mit der kälteren Zuluft gekühlt. Obwohl nicht ganz ideal, kommt dieses System am häufigsten zur Anwendung. Vor allem in Räumen mit konvektiven Wärmelasten ist die Luftumwälzung so gross, dass sich immer eine Mischluft-Situation einstellt.

### 5.3 Quelllüftung

Bei der Quelllüftung wird die kühlere Raumluft aus Bodennähe durch Wärmequellen in den Dekkenbereich transportiert und dort als "verbrauchte" Luft wieder abgeführt. Praktisch wird aber jede Quelllüftung zum Teil auch eine Mischlüftung sein, da sich die Vermischung der Luft nicht verhindern lässt. Trotzdem ist die Quelllüftung bezüglich Schadstoff- und Wärmeabtransport besser als die reine Mischlüftung. Damit das System funktioniert, muss vor allem sichergestellt sein, dass die Zuluft immer etwas kühler ist (ca. 2 K) als die Raumluft. Vor allem Luftansaug-Erdregister sind in der Lage diese Bedingung rein passiv zu erfüllen.

### 5.4 Bauteilkühlung

Die Bauteilkühlung - meist Betondeckenkühlung - stellt eine besondere Art der klassischen Deckenkühlung dar. Durch ihre Trägheit ist sie besser in der Lage Lastspitzen abzufangen. Eine 30 cm dicke Decke, welcher  $225 \text{ Wh/m}^2$  zugeführt werden, erwärmt sich im Durchschnitt nur um 1 K. Die gespeicherte Wärme kann nachts, wenn kalte Außenluft verfügbar ist über ein eingelegtes Leitungssystem wieder abgeführt werden. Die Leistungsfähigkeit dieses Systems wird vor allem durch den langsamen Wärmeübergang von der Raumluft in die Betondecke limitiert.

Das System ist in der Schweiz schon weit verbreitet, da es sich nicht nur zum Kühlen, sondern auch zum Beheizen von Gebäuden eignet. Eine Voraussetzung dafür ist allerdings, dass auch die Heizlast des Raumes in einer ähnlichen Größenordnung ist wie die Kühllast. Detailliertere Angaben dazu sind im Kapitel 8 zu finden.

### 5.5 Lokale Kühlung

Die lokale Kühlung fasst die Wärme direkt wo sie entsteht. Bei Geräten und Beleuchtungskörpern kann diese Wärme bei Temperaturen, die einiges höher sind als die zulässigen Raumtemperaturen, abgeführt werden. Dadurch lässt sich die Wärme viel effizienter abführen. Bei der Beleuchtung geschieht dies über Abluftleuchten. Bei Geräten haben sich wassergekühlte Systeme gut bewährt. Selbst bei Temperaturen knapp über  $20^\circ\text{C}$  des Kühlwassers können noch grosse Wärmelasten abgeführt werden. Hinweise dazu sind im Kapitel 9 zu finden.

### 5.6 Klimaanlage

Die Klimaanlage, welche mittels Kälteaggregat und grossen Luftmengen den Raum kühlt, gilt als konventionelles System der Klimatechnik und wird hier nicht speziell behandelt.

### 5.7 Kühldecke

Die Kühldecke kommt dort zum Einsatz, wo grosse momentane Wärmelasten abzuführen sind. Im Vordergrund stehen Computerräume, sofern die lokale Kühlung nicht möglich ist, sowie Schulungsräume und Konferenzräume mit dichter Belegung.

Durch den Strahlungsaustausch mit den grossflächigen Deckenelementen ist ein rasches und effizientes Abführen grosser Wärmelasten möglich. Der Betrieb ist jedoch im Normalfall auf den Einsatz von Kältemaschinen angewiesen.

### *Literaturhinweise*

- [3.1] I. Plato: Low Energy Cooling - Bearbeitung eines Verfahrens zur Auswahl des optimalen Raumkühlkonzepts während der Entwurfsphase, insbesondere zur Evaluation passiver und hybrider Systeme in Bürogebäuden, RWTH Aachen/EMPA Dübendorf, Juli 1995
- [3.2] C.-A. Roulet et al: SIA Norm 180 "Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau", SIA, Ausgabe 1999, Zürich
- [3.3] K. Meier et al: SIA Empfehlung 380/1 "Energie im Hochbau", SIA, Ausgabe 1988, Zürich
- [3.4] U. Steinemann et al: SIA Empfehlung V 382/2 "Kühlleistungsbedarf von Gebäuden", SIA, Ausgabe 1992 (in verlängerter Vernehmlassung), Zürich
- [3.5] U. Steinemann et al: SIA Empfehlung V 382/3 "Bedarfsermittlung für lüftungs-technische Anlagen", SIA, Ausgabe 1992 (in verlängerter Vernehmlassung), Zürich
- [3.6] SWKI Richtlinie 95-3 "Jährlicher Energiebedarf von lüftungstechnischen Anlagen", Schweiz. Verein von Wärme- und Klima Ingenieuren, Bern, 1997
- [3.7] Th. Baumgartner, U. Steinemann, W. Geiger: SIA Dokumentation D 012 Meteodata für die Haustechnik, SIA, Zürich, Januar 1987

## 4. Natürliche und mechanische Nachtlüftung

Das mitteleuropäischen Klima bietet eine verhältnismässig gute Voraussetzung für die passiven Kühlung mit natürlicher und mechanischer Lüftung. Auch während den heissten Sommertagen kühlen die Nächte fast immer unter 20 °C ab. Mit diesen tiefen Nacht-Temperaturen können die Wärmelasten des Tages, bei geeigneten Rahmenbedingungen, wieder abgeführt werden. Zu den geeigneten und notwendigen Rahmenbedingungen gehören:

1. Begrenzung der Wärmelasten,
2. Speichermasse im Gebäudeinnern und
3. funktionierendes Lüftungskonzept.

Mit natürlicher Lüftung können über offene Fenster grosse Luftbewegungen erreicht werden. Luftwechsel von über  $10 \text{ h}^{-1}$  sind keine Seltenheit. Mit mechanischer Lüftung stösst man dagegen rascher an Grenzen, da der Transportaufwand zu gross wird. Luftwechsel von über  $4 \text{ h}^{-1}$  sind kaum mehr sinnvoll.

Dafür braucht die natürliche Lüftung ein sorgfältiges Benutzerverhalten. Durch unzweckmässiges Lüften können auch unerwünschte Wärmelasten dem Raum zugeführt werden. Aber auch eine Unterkühlung des Raumes ist möglich, da die Nachttemperaturen und Windverhältnisse nicht immer vorhersehbar sind. Gerade die als effizient bekannte Querlüftung kann diese Problem verstärken. Mit rein gefühlsmässigem Fensterlüften kann insbesondere bei Bürogebäuden kaum ein Optimum erreicht werden.



LESOCOOL

Für die Beurteilung der natürlichen und mechanischen Lüftung hat die ETH Lausanne das Programm LESOCOOL[4.1] erarbeitet. Mit LESOCOOL kann der Einfluss der Lüftung sehr rasch beurteilt werden.

Die aus verschiedenen Lüftungsstrategien resultierenden Raumtemperaturen können verglichen werden. Das Programm berücksichtigt die Wärmelasten, den Einfluss der Speichermasse und die nächtliche Auskühlung. Der natürliche Luftwechsel wird aufgrund der Raumgeometrie berechnet (allerdings nur bei Windstille), die mechanische Lüftung kann definiert werden.

Mit diesem Programm wurden auch die nachfolgenden Simulationen durchgeführt.

### Kontrollierte natürliche Lüftung

Natürlich Lüften ist effizient aber schwierig kontrollierbar. Mechanische Hilfen wurden entwickelt, um auch das passive, natürliche Lüften kontrollierbar zu machen.

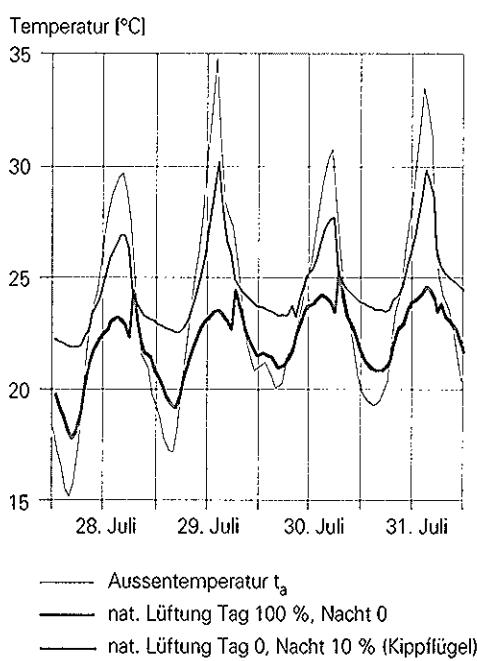
- Klappen, welche kleine Öffnungen bei Bedarf öffnen und schliessen wurden für die Lüftung entwickelt. Zur Kühlung kann damit jedoch kein genügender Luftwechsel erzielt werden.
- Mechanische Antriebe für Fensterflügel sind möglich aber teuer. Die Kosten übersteigen in der Regel diejenigen einer einfachen mechanischen Lüftungsanlage.

*Das mitteleuropäische Klima ist gut geeignet für die natürliche Nachtlüftung. Der Kühlereffekt ist jedoch stark vom Benutzer abhängig und durch warme Außentemperaturen am Tag limitiert.*

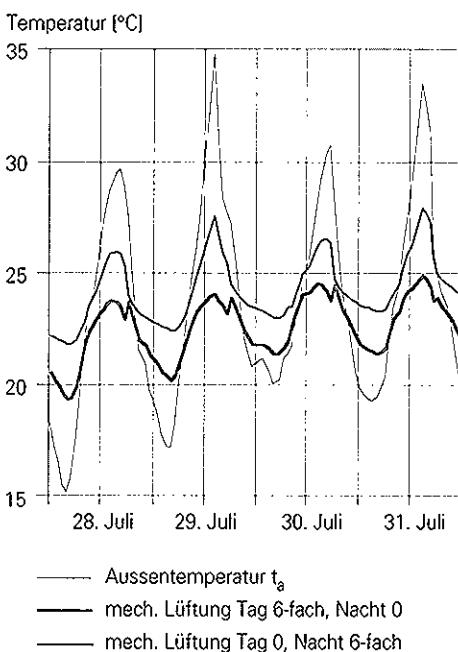
Natürlich Lüften bleibt somit Benutzersache. Durch geeignete Architektur und Anordnung der Fensterflügel kann jedoch effizientes Lüften ohne Durchzug, Einbruch und Gewittergefahr ermöglicht werden.

## Richtiges Lüften

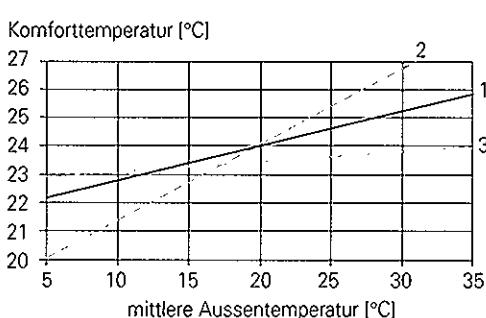
**Figur 4-1:** Gegenüberstellung von natürlicher Tag- und Nachtlüftung während 4 Tagen, (hohe Speichermasse). Die Lüftung erfolgt bei Tag (8-18 Uhr) über 2 m<sup>2</sup> Fensterfläche resp. nachts (22-10 Uhr) über die selben Fenster in Kippstellung (10 % Öffnung). Interessant ist, dass die natürliche Lüftung mindestens soviel bringt wie ein 6-facher mechanischer Luftwechsel gemäss Figur 4-2. Klar ist auch, dass sich überraschendes Lüften am Tag ungünstig auswirkt.



**Figur 4-2:** Gegenüberstellung einer mechanischen Lüftung als Vergleich zur natürlichen Lüftung gemäss Figur 4-1. Die mechanische Lüftung erfolgt wiederum am Tag (8-18 Uhr) resp. nachts (22-10 Uhr) mit einem 6-fachen Luftwechsel. Die mechanische Lüftung nachts ist ähnlich gut wie natürliche Lüftung. Tagsüber Lüften ergibt ebenfalls eine unerwünschte Erwärmung, allerdings nicht so massiv wie bei natürlicher Lüftung.



**Figur 4-3:** Einfluss der natürlichen (Luftbewegung) auf das Temperaturrempfinden des Menschen.  
 1 "statisches" PMV-Modell nach Fanger  
 2 natürlich belüftet  
 3 klimatisiert (nach ASHRAE RP-884)



Das Lüften im Sommer hat am Tag drei Funktionen:

1. Lufthygiene
2. Wärmetransport
3. Luftbewegung

Für diese drei Funktionen bestehen z.T. Zielkonflikte, insbesondere während dem Nachmittag. Nur nachts und in den frühen Morgenstunden bedeutet frische Luft auch kühle Luft. Sobald die Aussentemperatur die Innentemperatur übersteigt, beginnt bei starkem Luftwechsel eine unerwünschte Aufwärmung der Speichermasse. Gefühlsmäßig wird aber die bewegte, warme Luft noch lange als angenehm und sogar kühl empfunden, dies durch die erhöhte Konvektion an der Hautoberfläche. Während der heißesten Tageszeit bis in den Abend hinein besteht der grösste hygienisch bedingte Lüftungsbedarf (Schwitzen/starke Ausdünstung), aus der Sicht der Gebäudemasse sollte jedoch die warme Luft draussen gehalten werden.

### Hygienisch bedingter Luftwechsel

Bei durchschnittlicher Bürobelegung, 15 bis 20 m<sup>2</sup>/Person, und in Nichtraucherbüros genügt ein 0.5 bis 1-facher Luftwechsel zur Lufterneuerung. Diese kleinen Luftwechsel beeinträchtigen die Kühlhaltung der Gebäudespeichermasse nur unbedeutend.

Eine ausgekühlte Gebäudespeichermasse erlaubt eine Reduktion des Luftwechsels während den heißesten Tagesstunden auf 0.5 bis 1 h<sup>-1</sup>. Nur in zu warmen Räumen ist ein höherer Luftwechsel notwendig.

### Luftbewegung

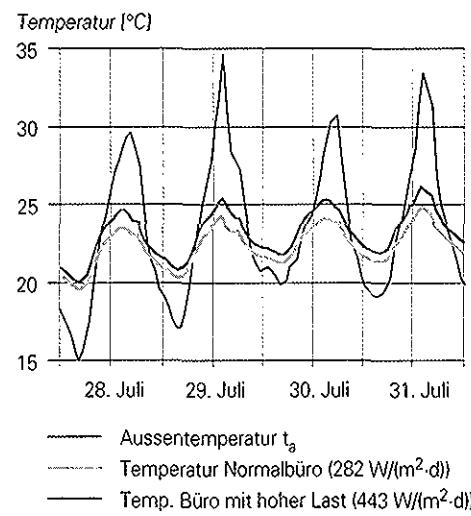
Mit zunehmender Luftbewegung steigt die Konvektion. Was für den Menschen angenehm sein kann ist bei warmen Aussentemperaturen für die Raumerwärmung unvorteilhaft. Die erwünschte Luftbewegung kann in diesem Fall mit Hilfe von Decken- oder Standventilatoren erzeugt werden.

Wärmelasten  
klein halten!

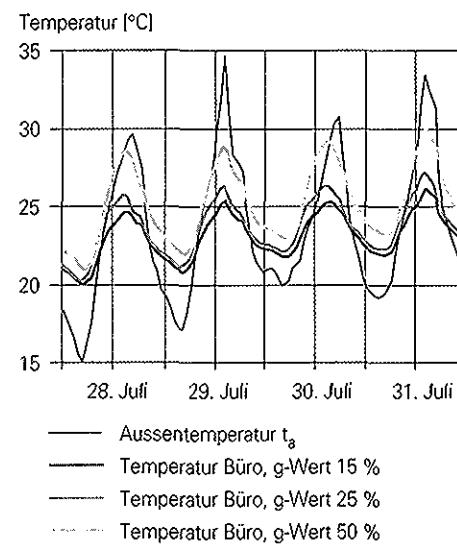
Da bei natürlicher und mechanischer Lüftung die Wärme oft nur nachts abgeführt werden kann, muss vor allem die Überwärmung der Räume tagsüber vermieden werden. Dazu ist die Reduktion der Wärmelasten auf ein Minimum eine wichtige Voraussetzung (max. ca. 150 Wh/(m<sup>2</sup>·d), siehe Kapitel 3).

Problematisch sind häufig:

- Sonneneinstrahlung auf der Ostseite, da sie die Räume schon frühmorgens aufheizt und die Wärmenicht mehr abgeführt werden kann,
- innere Wärmelasten durch Geräte und künstliche Beleuchtung,
- Luftwechsel bei hohen Außentemperaturen oder bei Erwärmung der Außenluft durch die Fassade. Insbesondere beim Querlüften entsteht durch die Luftbewegung der Eindruck, die Außenluft sei kühler, in Wirklichkeit erwärmt sie das Gebäude bereits leicht auf. Bei niedrigen Luftwechseln zur Sicherstellung der Luftqualität (<1 h<sup>-1</sup>) bleibt der Wärmeeintrag jedoch gering.



Figur 4-4:  
Einfluss der internen Last.  
Technische Büros (Normalbüros) mit den kleinsten Wärmelasten (282 Wh/(m<sup>2</sup>·d)) und hochtechnisierte Büros mit den hohen Wärmelasten (443 Wh/(m<sup>2</sup>·d)) Administrative Büros weisen mittlere Lasten auf. Bei gleichen Raumbedingungen resultiert beim hochtechnisierten Büro eine 1 - 2 Kelvin höhere Innenraumtemperatur gegenüber dem Normalbüro.



Figur 4-5:  
Einfluss der externen Last.  
Ein ungenügender Sonnenschutz resultiert in einer starken Erwärmung des Büraumes. Der Einfluss ist größer als derjenige der üblichen internen Lasten.

Die Speichermasse des Gebäudes ist das Stabilisierungselement der Raumtemperatur. Je größer die Speichermasse, desto gleichmässiger die Innentemperaturen. Große Speichermassen (Rohdichte · spezifische Wärmekapazität:  $\rho \cdot c$ ) glätten generell die Temperaturschwankungen über mehrere Tage. Für die Temperaturschwankungen innerhalb eines Tagesablaufs sind die Oberflächen im Innenraum von ausschlaggebender Bedeutung. Der Wärmeeindringkoeffizient  $b$  ist das Mass für die kurzfristige Wirkung. Je höher der Wärmeeindringkoeffizient ist, desto schneller kann Wärme durch die Materialoberfläche aufgenommen oder abgegeben werden. Die

### Speichermasse

**Tabelle 4-1:**  
Material-Koeffizienten gemäss LESOCOOL. Schwere Baustoffe haben wesentlich bessere thermische Eigenschaften. Die Wärmekapazität steht für die potentiell vorhandene Speichermasse, die Wärme-eindringzahl für die Geschwindigkeit der Wärmeaufnahme resp. -abgabe. Oft ist bei natürlicher Lüftung letztere Eigenschaft ausschlaggebend.

Material	Wärme-kapazität p·c MJ/(m <sup>3</sup> ·K)	Wärme-eindring-koeffizient b Ws <sup>1/2</sup> /(m <sup>2</sup> ·K)
Wärmedämmung	42	42
Holz	780	330
Gips	779	353
Spanplatten	1029	392
Eiche	1620	583
Leichtbeton	1200	675
Isoliersteine	1027	608
Backsteine normal	1343	912
Backsteine voll	1501	1102
Zementsteine	1933	1390
Stahlbeton	2637	2178
Granit	2621	3028
Stahl	3674	14846

Wärmespitzen am Tag können somit aufgenommen und bei Nacht wieder abgegeben werden.

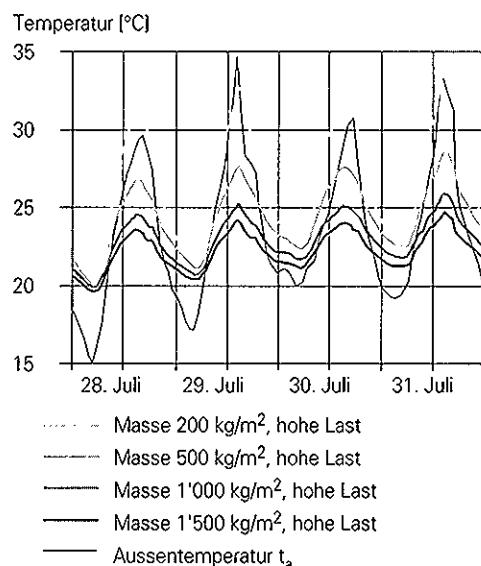
Bei fehlender oder kleiner Speichermasse und tiefem Wärme-eindringkoeffizient können die Wärmelasten nur durch die Lüftung abgeführt werden. Bei hohen Außentemperaturen besteht somit keine Kühlmöglichkeit mehr. In solchen Fällen entsteht ein sogenanntes Barackenklima, welches nur mit starker Luftbewegung reduziert werden kann.

Die Speichermasse muss während den Nacht- und Morgenstunden, mit kühler Lufttemperatur intensiv belüftet und damit ausgekühlt werden. Stosslüften und morgendliches Lüften genügen dazu nicht. Die Eindringzeit ist zu kurz. Die Auskühlperiode sollte mindestens etwa 5 Stunden dauern. Idealerweise sollte ein maximaler Luftwechsel zwischen 22 Uhr abends und 10 Uhr morgens gewährleistet sein.

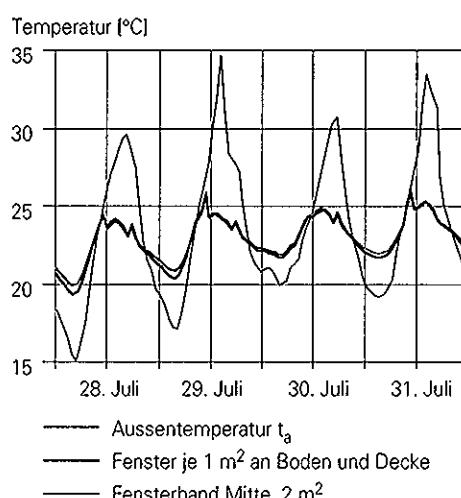
Bei Massivbauweise ist in der Regel immer genügend Masse vorhanden. Der grösste Beitrag dazu liefern die Betondecken mit etwa 180 Wh/(m<sup>2</sup>·K). Backsteinwände mit etwa 12 % Flächenanteil (Anteil an Bruttogeschossfläche) können 120 Wh/(m<sup>2</sup>·K) speichern. Ein so gebauter Raum würde sich selbst bei hohen Wärmelasten von 300 Wh/(m<sup>2</sup>·d) täglich nur um ein Kelvin erhöhen. Tagsüber ist natürlich mit höheren Temperaturen zu rechnen.

10 cm dicke Gipswände können dagegen nur etwa 35 Wh/(m<sup>2</sup>·K) aufnehmen und Gipskartonwände nur etwa die Hälfte davon. Sind dann auch noch Boden und Decke thermisch abgekoppelt oder ebenfalls in leichter Bauweise ausgeführt, so ist die aktive Speichermasse für eine Nachtkühlung zu gering.

**Figur 4-6:**  
Einfluss der Speichermasse auf den Raumtemperaturverlauf (hochtechnisiertes Büro, Lüftung 2-fach tags, 4-fach nachts, Südorientierung, g-Wert 15 %)



**Lage der Lüftungsöffnungen**



**Figur 4-7:**  
Der Einfluss der Lage der Fensteröffnung ist relativ gering (8 - 12 offen 100 %, sonst Kippstellung 20 %). Der Einfluss ist sehr gering.

Die Lage der Lüftungsöffnungen beeinflusst in normalen Räumen die Kühlwirkung nicht besonders. Natürlich ist die Möglichkeit zur Querlüftung vorteilhaft, da absolute Windstille nur sehr selten auftritt.

Auch die Ausnutzung der Thermik über mehrere Geschosse – über Atrien oder Treppenhäuser – kann interessant sein. Allerdings funktioniert der thermische Auftrieb nur, wenn die Raumluft wärmer ist als die Außenluft, also vor allem nachts.

## Natürliche oder mechanische Lüftung?

Natürliche Lüftung braucht Lüftungsöffnungen und Druckdifferenzen. Die Druckdifferenzen entstehen durch Temperaturunterschiede und Wind. Bei Wind genügen schon relativ kleine Lüftungsöffnungen. Ohne Druckdifferenzen bringen auch grosse Lüftungsöffnungen nur mässigen Kühlungserfolg. Je näher sich die Innen- und Aussen-temperatur annähern, desto kleiner wird bei Windstille die Druckdifferenz und damit der Luftwechsel. Der Luftwechsel erhöht sich mit zunehmender Temperaturdifferenz: dies ist eine gute Voraussetzung für die Nachtauskühlung.

Die mechanische Lüftung bietet im Gegensatz zur natürlichen Lüftung konstante und planbare Luftwechsel. Der Selbstregulierungseffekt des natürlichen Luftwechsels, muss bei der mechanischen Lüftung durch eine geschickte Lüftungsregulierung ersetzt werden. Bei kleinen oder fehlenden Druckdifferenzen ist der gewünschte Luftwechsel problemlos zu erreichen. Für Gebäude mit hohen inneren Wärmelasten bietet die mechanische Lüftung mehr Möglichkeiten für einen planbaren, zuverlässigeren Betrieb. Zudem kann durch die Wahl und Anordnung des Lüftungssystems gezielter gelüftet werden.

Denkbar ist bei mechanischer Lüftung die Luftführung durch Bauteile. Dadurch lässt sich die Gebäudemasse gezielter auskühlen. Verschiedene Objekte wurden in dieser Art bereits realisiert und funktionieren zufriedenstellend. In neuerer Zeit wurden sie jedoch von wasserführenden System zur Bauteilkühlung verdrängt. Diese sind in der Regel vielseitiger einsetzbar, einfacher realisierbar und effizienter (vgl. Kap. 8).

### Wohngebäude

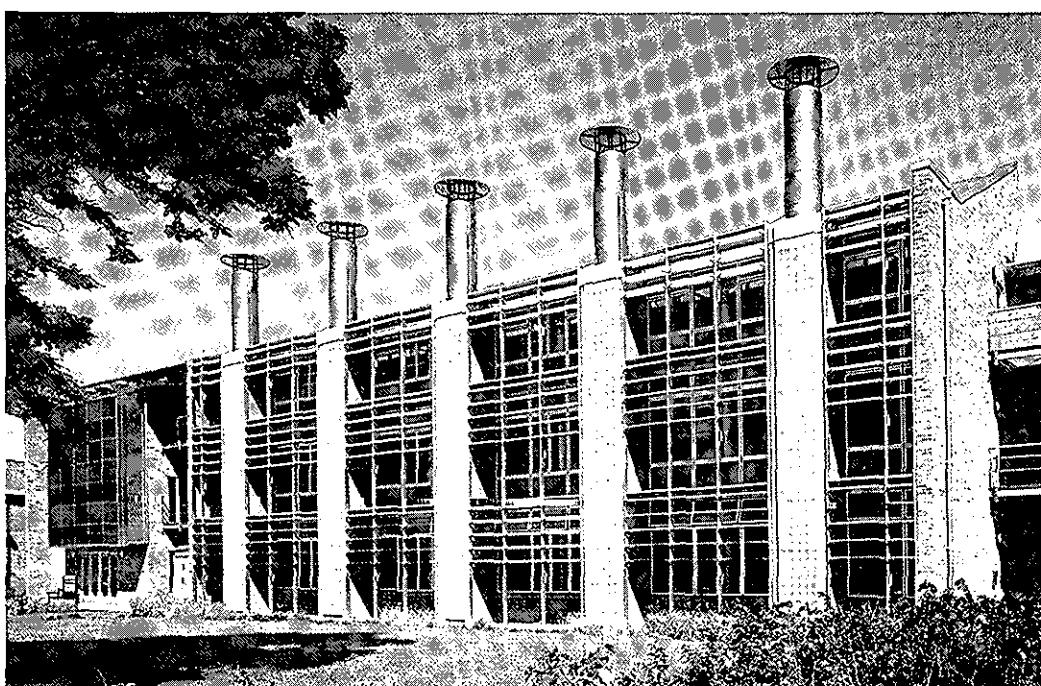
- Natürliche Lüftung ist für Wohngebäude eine gute Option. Hier kann der Bewohner eine angemessene Nachtlüftung sicherstellen.
- Mechanische Lüftung ist auch bei Wohngebäuden angebracht, bei Aussenlärm und schlechter Luftqualität.
- Eine Ergänzung der natürlichen Lüftung durch eine mechanische Anlage ermöglicht nicht nur die Wärmerückgewinnung im Winter, sondern auch gezieltes Lüften bei beruflicher Abwesenheit oder eine Linderung bei asthmatischen Beschwerden (Heuschnupfen/Staubmilben).

*Der Vorteil der Kühlung mit natürlicher Lüftung besteht im effizienten Luftaustausch mit geringen Betriebskosten.*

### Bürogebäude

- Bürogebäude mit natürlicher Lüftung erfordern spezielle architektonische und/oder technische Massnahmen. Sie können durchaus einen architektonischen Mehrwert ergeben.
- Die unkontrollierte natürliche Lüftung am Tag ist problematisch. Sie verursacht rasch einen unerwünschten Wärmeeintrag.
- Die mechanische Bürolüftung ist nicht effizienter als die natürliche Nachtlüftung, aber zuverlässiger.
- Mechanisch unterstützte Lüftungssysteme können besser mit andern Kühlsystemen kombiniert werden. Besonders interessant sind Luftsaug-Erdregister zur Vorkonditionierung der Luft (vgl. Kap. 6).
- Mechanische Lüftungsanlagen erlauben im Winter ein energieeffizientes Lüften mit Wärmerückgewinnung und gutem Komfort.

*Der Vorteil der Kühlung mit mechanischen Lüftung besteht primär in der betrieblichen Zuverlässigkeit*



Figur 4-8:  
Die natürliche Lüftung von grossen Bürogebäuden führt oft zu speziellen architektonischen Konzepten, die auch reizvoll sein können.  
(Beispiel BRE Gebäude, Watford UK mit "Solarkaminen", welche sich bei Sonnenschein erwärmen und kühle Luft nachziehen)

Bei der mechanischen Nachtlüftung ist vor allem auf einen geringen Druckverlust (Empfehlung SIA 382/3 Ziffer 5.4) und auf gute Ventilatorenwirkungsgrade zu achten. Als Schaltkriterium kann beispielsweise  $t_i > 24^\circ\text{C}$  und  $t_i - t_a > 2\text{K}$  gewählt werden.

Bei gut ausgelegten Anlagen ist die mechanische Nachtlüftung der Kühlung mit Kältemaschine überlegen. Aus ökonomischer und ökologischer Sicht könnte man sich sogar einen gewissen Mehrverbrauch leisten, wenn dadurch auf die mechanische Kühlung verzichtet werden kann.

#### *Literaturhinweise*

- [4.1] F. Flourentzos, J. Van Der Maas, C.-A. Roulet: Programm LESOCOOL 1.0, Passive Cooling by Night Time Ventilation, LESO-PB, EPFL, 1015 Lausanne, Oktober 1996
- [4.2] M. Santamouris, A. Argirou et al: PASCOOL Software CD-ROM mit 14 Softwarepaketen des PASCOOL-Programms der EU, University of Athens, 1995
- [4.3] M. Zimmermann, J. Andersson et al: IEA Annex 28 Low Energy Cooling, Case Studies of Low Energy Cooling Technologies, Night Ventilation - Natural Ventilation / Mechanical Ventilation, EMPA, August 1998 ISBN 3-905594-07-2
- [4.4] H. Roel et al: IEA Annex 28 Low Energy Cooling, Detailed Design Tools for Low Energy Cooling Technologies, Natural Night Ventilation, 1999

## 5. Verdunstungskühlung

Das Verfahren der Verdunstungskühlung – auch adiabatische Kühlung genannt – ist schon seit längerem bekannt und wird in der Industrie bei raumlufttechnischen Anlagen öfters eingesetzt.

Die Möglichkeit der direkten Befeuchtungskühlung im Außen- bzw. Zuluftstrom ist wegen des Anstiegs der relativen Luftfeuchte der Zuluft, vor allem im Sommer im mitteleuropäischen Klima, unerwünscht und nicht zu empfehlen. Bei hoher Luftfeuchtigkeit wird die Wärmeabfuhr des menschlichen Körpers mittels Verdunstung erschwert, der Schweiß verbleibt als Wasserfilm auf der Haut, so dass sich der Mensch unbehaglich fühlt. Die direkte Befeuchtung der Zuluft ist nur in Regionen sinnvoll, wo im Sommer die Außenluft sehr trocken ist.

Demgegenüber ist es aber möglich die Abluft mit verschiedenen Verfahren adiabatisch herunterzukühlen, da diese Luft im Gebäude keine Verwendung mehr findet. Die durch die adiabatische Befeuchtung gewonnene Kälteenergie kann über eine Energierückgewinnung auf den Zuluftstrom übertragen werden.

Im h,x-Diagramm lässt sich dieser Prozess gemäß Figur 5-1 darstellen. Der Kühlprozess nach dem Prinzip der Abluftbefeuchtung macht deutlich, dass die Verdampfungstemperatur vom jeweiligen Außenluft- bzw. Abluftzustand abhängig ist. Das Wasser wird (abgesehen von Pumpenenergie und Wärmeaustausch mit der Umgebung) weder beheizt noch gekühlt. Es nimmt im Idealfall die Feuchtkugeltemperatur an.

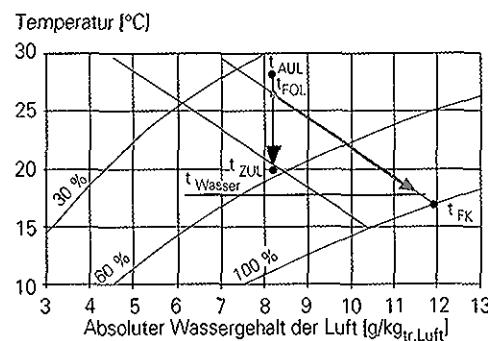
Wie gross das Kühlpotential ist, hängt im wesentlichen von der absoluten Feuchte der Außenluft ab, da diese hauptsächlich den Feuchtegehalt der Abluft bestimmt.

Falls im Gebäude selbst Feuchtigkeit produziert wird, eignet sich die adiabatische Kühlung nicht.

Die Planungshinweise zur Verdunstungskühlung basieren auf den unter der Leitung von Hans-Peter Krüttli durchgeföhrten Untersuchungen, welche sich auf detaillierte EMPA Simulationen mit dem Programm DOE-2 und auf Messungen an einer realen Anlage beziehen. Die umfassenden Ergebnisse wurden 1995 im Bericht

*\*Einsparung elektrischer Energie in lufttechnischen Anlagen mit adiabatischer Kühlung\* [5.1]*

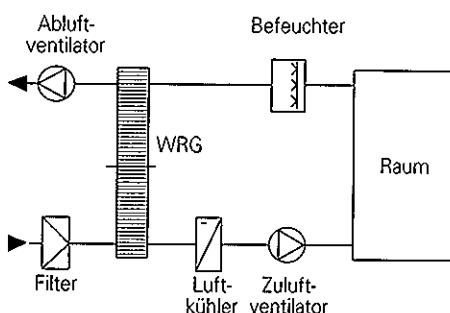
veröffentlicht.



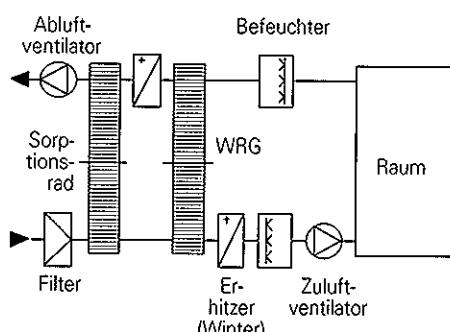
Figur 5-1:  
Abluftbefeuchtung/Aussenluftkühlung (Ausschnitt aus h,x-Diagramm). Die Abluftbefeuchtung ist grau dargestellt, die adiabatische Zuluftkühlung schwarz.

## Systemvarianten

Figur 5-2:  
Schema einer Abluft-befeuchtungsanlage



Figur 5-3:  
Schema einer Sorptionsge-stützten Kühlung (Dessicant Cooling) als Weiterentwick-lung der Verdunstungskühlung. Hier wird die Zuluft mit-tels Solarwärme oder Abwär-me über ein Sorptionsrad ge-drocknet. Dadurch kann die Zuluft zusätzlich auch noch direkt befeuchtet werden.



Der klassische Fall einer adiabatischen Kühlung, wie sie im europäischen Raum normalerweise zum Einsatz kommt, ist eine Befeuchtung der Abluft kombiniert mit einer Rückgewinnung der Kälte über ein Wärmerückgewinnungs-System (WRG). Bei den nachfolgend betrachteten lufttechnischen Anlagen handelt es sich immer um dieses System.

Die beiden wichtigsten Komponenten in diesem System sind der Befeuchter und die WRG. Sie können technisch verschieden ausgeführt sein, was auf die Wirksamkeit, auf den Hilfsenergieverbrauch und den Bedarf an einer besonderen Wasseraufbereitung sowie auf die Investitionen Auswirkungen hat. Folgende Varianten sind üblich:

### Befeuchtung:

- Luftwäscher
- Kontaktbefeuchter
- Kaltdampfgenerator

### WRG:

- Sensibler Rotor (ohne Feuchteaustausch)
- Kreislaufverbund-System
- Plattenwärmetauscher

Die untersuchten Systemvarianten sind aus den Figuren 5-4 und 5-5 ersichtlich. Die verwendeten Wirkungsgrade, "Hilfsenergie"-Leistungen und Druckdifferenzen der Komponenten sind in den Tabellen 5-1 und 5-2 wiedergegeben.

Die Systemkombinationen wurden für zwei Lastfälle und für die zwei konstant gehaltene Zulufttemperaturwerte von 15 bzw. 18 °C berechnet.

Tabelle 5-1:  
Eigenschaften der  
Befeuchtertypen

	Befeuchtungswirkungsgrad	Antriebsleistung [kW]		Druckdifferenz [Pa]	
		Pumpe	UV-Strahler	Betrieb	mit Bypass
Luftwäscher	0.94	2.65	0.2	80	40
Kontaktbefeuchter	0.85	0.14	-	140	40
Kaltdampfgenerator	1.0	0.72	-	160	40

Tabelle 5-2:  
Eigenschaften der  
WRG-Typen

	Rückkühlzahl	Antriebsleistung [kW]	Druckdifferenz [Pa]	
			Betrieb	mit Bypass
Rotor	0.67	0.15	160	50
Kreislaufverbundene WRG	0.69	1.0	140	50
Plattentauscher	0.60	0	120	50

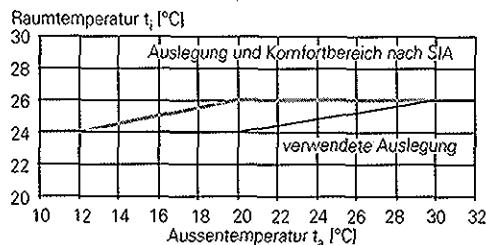
### Untersuchte Randbedingungen

Es wurde ein fiktives Gebäude simuliert mit einer klimatisierten Fläche von 1'500 m<sup>2</sup>. Es setzt sich aus insgesamt 68 gleichartigen Räumen zusammen, die gleichmäßig auf die 4 Hauptorientierungen verteilt sind. Die Räume entsprechen dem für die Kühllastrechnung verwendeten Raummodul aus SIA V 382/2 mit einer Fläche von 22 m<sup>2</sup> und weisen schwere Böden und Decken, leichte Innenwände und eine mittelschwere Außenwand auf (vgl. S. 17). Die mit einer Zweifach-Wärmeschutzverglasung ausgerüsteten Fenster haben eine aussenliegende Lamellenstore.

Für die Betriebs- und Belegungszeiten wurden die Tagesgänge gemäss SIA V 382/2 verwendet und der Technisierungsgrad als hoch angenommen. Damit ergeben sich interne Lasten von:

	Einzel- Büro [W/m <sup>2</sup> ]	Gruppen- Büro [Wh/(m <sup>2</sup> ·d)]	Gruppen- Büro [Wh/(m <sup>2</sup> ·d)]
• Beleuchtung:	10	100	22
• Personen: sensibel	7	63	49
latent	6	55	42
• Geräte:	15	135	105
• Total	38	353	218

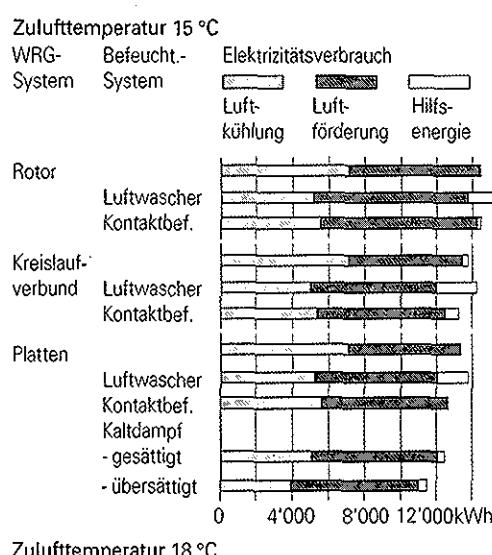
Der Sollwert für die Raumlufttemperatur ist aussentemperaturabhängig. Das Freigabekriterium der adiabatischen Abluftkühlung ist AUL-Temperatur > ABL-Temperatur + 2 K.



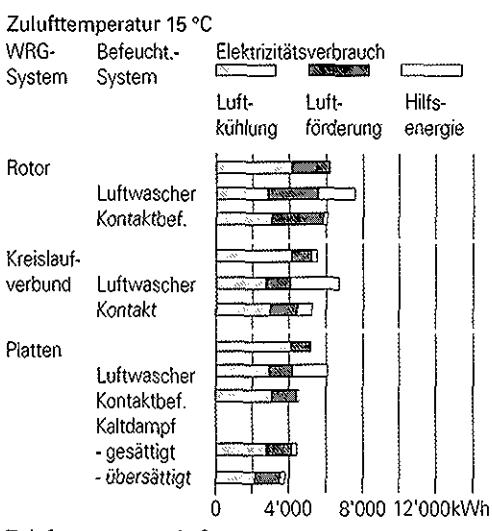
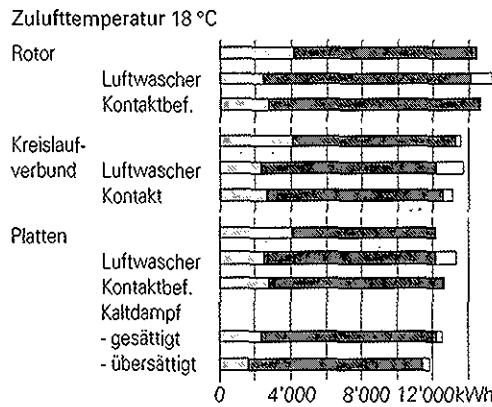
Bei der Anlage handelt es sich um ein VVS-System mit einem Luftvolumenstrom von 5'000 - 13'000 m<sup>3</sup>/h und Betriebszeiten gemäss SIA V 382/2, d.h.:

- Einzelbüro: 07.00-17.00 Uhr
- Gruppenbüro: 06.00-18.00 Uhr

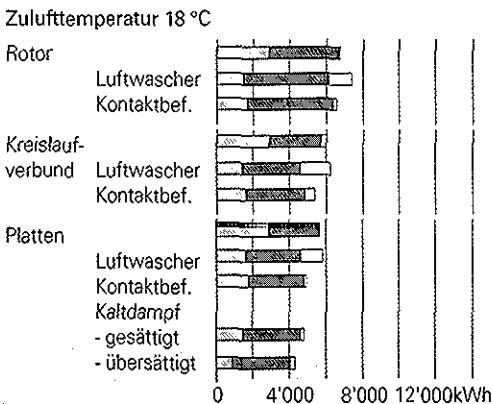
Die klimatischen Randbedingungen wurden mit den Daten des "Design Reference Year" für die Station Zürich SMA simuliert.

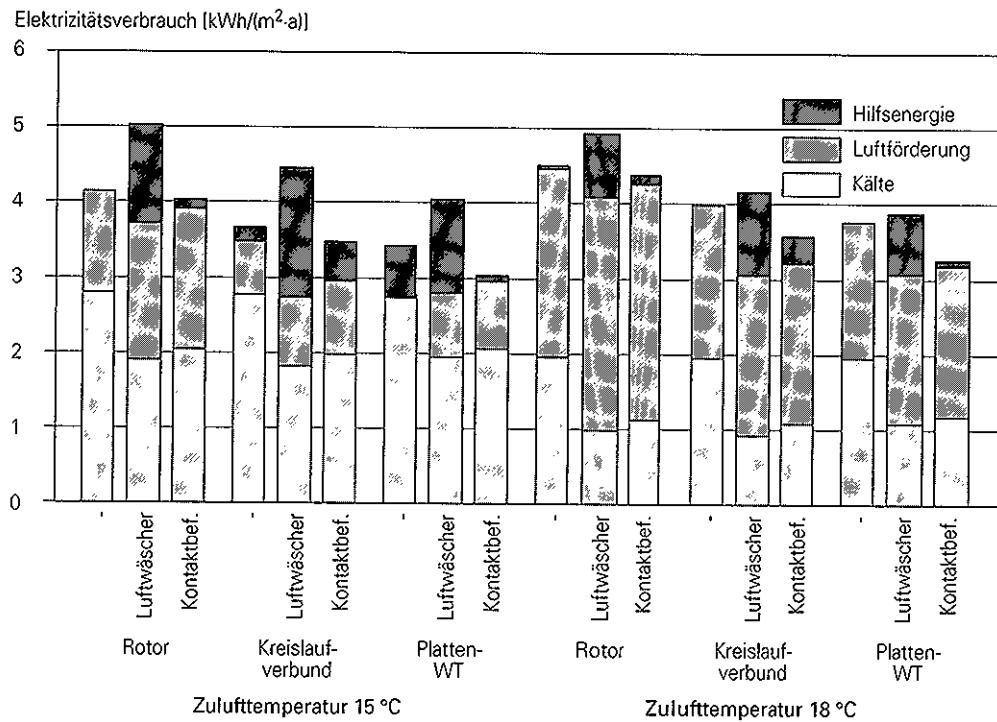


Figur 5-4:  
Einzelbüros:  
Energiebedarf für ver-  
schiedene adiabatische  
Systeme für hohe interne  
Last von 353 Wh/(m<sup>2</sup>·d).  
Mechanische Luftkühlung mit  
Leistungsziffer 3.  
Details siehe [5.1]



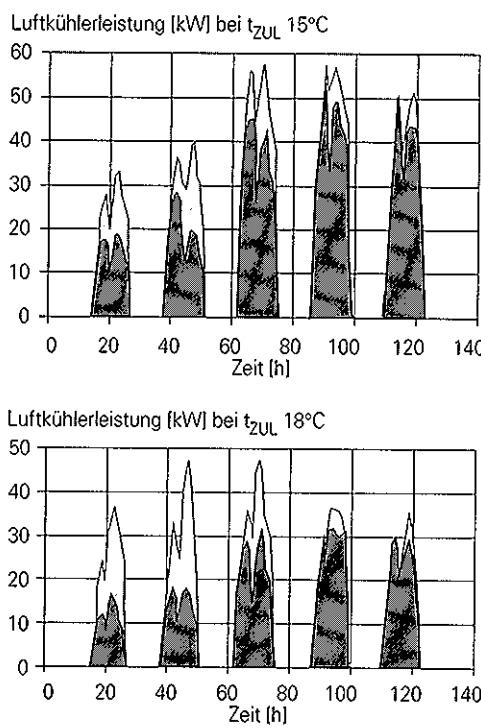
Figur 5-5:  
Gruppenbüros:  
Energiebedarf für  
verschiedene adiabatische  
Systeme für mittlere Last von  
218 Wh/(m<sup>2</sup>·d). Die Luftkühlung  
berücksichtigt die mit  
der Kältemaschine dem Luft-  
kühler zugeführte Energie mit  
einer Leistungsziffer von 3.  
Details siehe [5.1]





Figur 5-6:  
Graphische Darstellung des elektrischen Energieverbrauchs für den Lastfall "Gruppenbüro" auf einen m<sup>2</sup> bezogen. Der Energiebedarf des Luftkühlers ist mit einer Leistungsziffer von 3 gerechnet.

Figur 5-7:  
Luftkühlerleistung mit (dunkle Flächen) und ohne (hellen Flächen) adiabatische Kühlung bei Zulufttemperaturen von 15 °C (oben) resp. 18 °C (unten)



Die Resultate der Simulationen, sowie auch die Ergebnisse einer ergänzenden Studie [5.4] zeigen:

- Der totale elektrische Energieverbrauch für die Raumkühlung ist für Systeme mit hohem Hilfsenergieverbrauch (vor allem mit Luftwäschern) höher als ohne adiabatische Kühlung. Dies gilt auch dann, wenn die Kältemaschine nur mit einer Leistungsziffer von 2 arbeitet.
- Es zeigt sich, dass vor allem Luftwässcher schlechte Leistungszahlen verursachen. Der Hilfsenergieaufwand ist gross.
- Der Rotationswärmetauscher erzielt zusammen mit einem Kontaktbefeuchter eine gute Leistungszahl. Bei den rotierenden Wärmetauschern ist zwar der Luftförderungsaufwand am grössten, er entspricht aber demjenigen der mechanischen Kühlung.
- Besonders zu beachten sind die Luftleckagen bei rotierenden Wärmetauschern. Es muss dafür gesorgt werden, dass möglichst wenig feuchte Abluft in die Zuluft strömt.
- Ebenfalls gute Ergebnisse werden mit einem Kaldampfgenerator erreicht. Die Ergebnisse müssen jedoch vorsichtig interpretiert werden, da damit noch wenig Erfahrungen vorliegen.
- Bei 18 °C Zulufttemperatur wird die Luftförderung zum dominierenden Anteil des Ener-

gieverbrauchs, sofern Systeme mit ähnlichen Druckdifferenzen vorliegen. Falls geringere Druckdifferenzen bestehen, verliert die Luftförderung ihre Dominanz.

- Obschon die eingesparte Energie am Luftkühler bei 15 und bei 18 °C etwa gleich gross ist, wird der Hilfsenergieverbrauch bei 18 °C kleiner. Dies ist auf die kürzeren Betriebszeiten der adiabatischen Kühlung zurückzuführen, weil mehr Situationen mit freier Kühlung möglich sind.

### Systeme ohne Zusatzkühlung

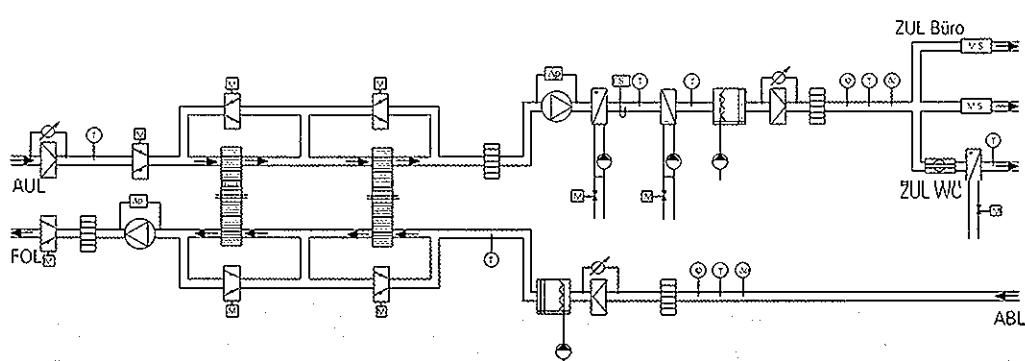
Die adiabatische Kühlung ist bei hohen internen Lasten von ca. 280 Wh/(m<sup>2</sup>·d) allein nicht in der Lage, den Komfort sicherzustellen. Sie kann nur die Kältemaschine unterstützen. Ohne zusätzliche Kältemaschine sollten die Lasten nicht über 150 Wh/(m<sup>2</sup>·d) betragen.

### Systeme mit Zusatzkühlung

Die Wirksamkeit der adiabatischen Abluft-Kühlung hängt im wesentlichen vom Befeuchtungswirkungsgrad und der Rückwärmezahl der WRG ab.

Damit das Verhältnis von wirksamer Kühlenergie zu elektrischer Hilfsenergie möglichst hoch wird, (höher als bei einer Kältemaschine (>3)), müssen folgende Punkte berücksichtigt werden:

- kleiner Energieverbrauch für die Luftbefeuchtung,
- kleiner Energieverbrauch für die Wasserbehandlung,
- kleiner Druckverlust der WRG bei hoher Rückwärmzahl,
- kleiner Hilfsenergieverbrauch der WRG,
- hoher Wirkungsgrad der Ventilatoren.

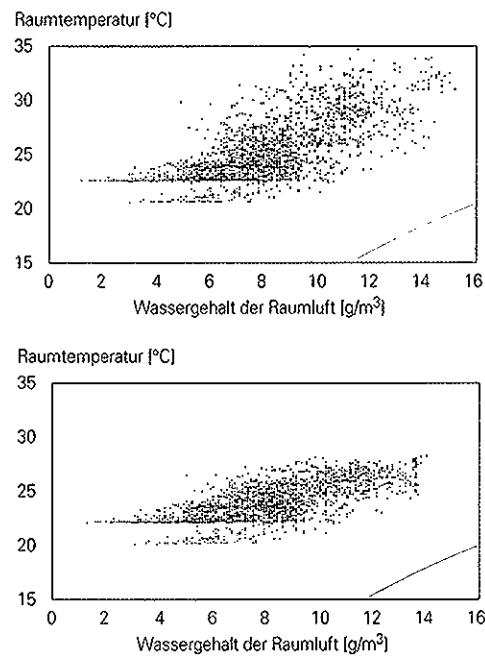


Leistungszahlen Verdunstungskühlung

Komponenten-Kombination	Leistungszahl
Platten-WRG mit Kontaktbefeuchter	≈ 44.0
Platten-WRG mit Kaltdampf übersättigt	≈ 18.0
Platten-WRG mit Kaltdampfgenerator	≈ 13.5
Rotations-WRG mit Kontaktbefeuchter	≈ 9.0
KVS-WRG mit Kontaktbefeuchter	≈ 8.5
KVS-WRG mit Kaltdampfgenerator	≈ 8.5
Rotations-WRG mit Luftwäscher	≈ 2.5
KVS-WRG mit Luftwäscher	≈ 8.5

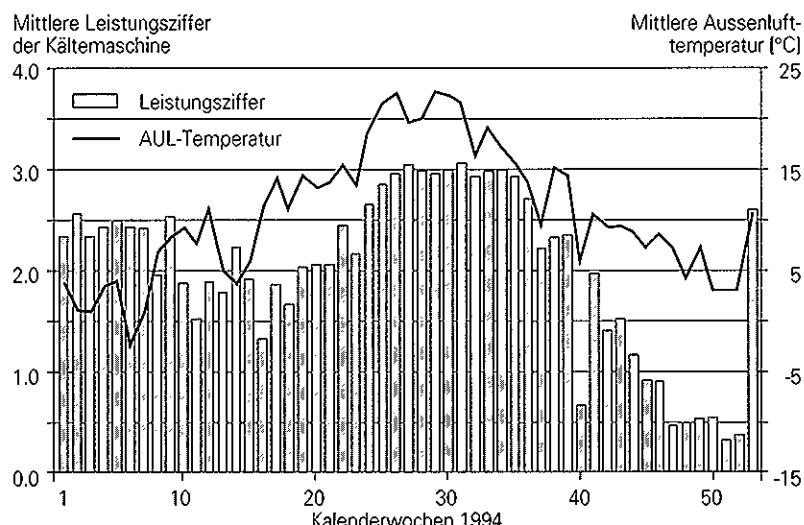
Tabelle 5-3:  
Effektive Leistungszahlen für verschiedene Verdunstungskühlsysteme gemäss [5.4]  
(Verhältnis der eingesparten Kühlenergie / elektrischer Hilfsenergie)

### Erkenntnisse aus Messungen



Figur 5-8:  
Raumtemperaturen von Einzelbüros (gemäss SIA V 382/3) ohne (oben) und mit (unten) Zusatzkühlung (18 °C) bei einer Luftaufbereitung mit einem Kaltdampfgenerator (ohne Übersättigung) kombiniert mit einem Plattentauscher.  
Die Erfahrung bestätigt, dass ohne Zusatzkühlung während vielen Stunden hohe Raumlufttemperaturen erwartet werden müssen. Diese hohen Temperaturen treten z.T. mit hohen Luftfeuchtigkeiten auf, was zu einem „schwülen“, unbehaglichen Raumklima führt.

Figur 5-9:  
Schema der untersuchten Anlage. Um den Feuchtaustausch im Winter zu ermöglichen wurden ein zweiter, hydroskopischer Rotorwärmetauscher eingesetzt.



**Figur 5-10:**  
Reale Leistungsziffern der gemessenen Anlage. Die Leistungsziffer der Kältemaschine liegt im Sommer bei etwa 3. Dieser Wert müsste mit jedem alternativen Kühlsystem auch erreicht werden. In der Übergangszeit ist sie wesentlich schlechter. Nachdem ab Woche 45 verschiedene Umluftkühlgeräte ausser Betrieb genommen wurden, sinkt die Leistungsziffer wegen der geringen Auslastung auf Werte weit unter 1.

Die Resultate, sowohl von Messungen wie auch der Berechnungen [5.1] zeigen:

- Mit vernünftigen Befeuchtungs- / WRG-Systemen sind elektrische Energieeinsparungen möglich. Der Gesamtenergiebedarf einer lufttechnischen Anlage wird dadurch jedoch nur unwesentlich beeinflusst.
- Wenn in einem Gebäude, mit einem internen Wärmeanfall durch Technik und Licht von 20 - 25 W/m<sup>2</sup>, auf eine zusätzliche Zuluftkühlung über eine Kältemaschine verzichtet wird, müssen Komforteinbussen in Kauf genommen werden.
- In den meisten Fällen sind dank einer kleineren Kältemaschine bzw. der Vermeidung eines Ausbaus der Kälteanlage Minderinvestitionen möglich sind.

Da sich die Randbedingungen bei lufttechnischen Anlagen stark unterscheiden können, gelten diese Aussagen als Tendenzen. Allgemeingültige Aussagen sind nicht möglich.

**Tabelle 5-4:**  
Nutzbare Kühlenergie und das Jahres-Verhältnis zur benötigten elektrischen Hilfsenergie (Q/E-Verhältnis) bei einem System mit Kaltdampfgenerator (ohne Übersättigung), einer WRG mit Rückwärmeszahl von 60 %, einer Zulufttemperatur von 18 °C. Mit einem kreislaufverbundenen System liegt das Verhältnis Q/E je nach Lastfall ca. 10 bis 30 % tiefer.

	nutzbare Kühlenergie	Leistungs-Ziffer
Gruppenbüro	2.8 kWh/(m <sup>2</sup> ·a)	7
Einzelbüro	3.5 kWh/(m <sup>2</sup> ·a)	5

Werden diese Kriterien berücksichtigt, so eignen sich am besten Systeme, die mit übersättigter Abluft arbeiten (Kaltdampfgenerator [5.9] [5.10]) bzw. solche, welche die Abluft im Wärmetauscher befeuchten [5.11]. Das sind z.B. Systeme, die feine Wasserstrahlen mit hohem Druck in den Wärmetauscher spritzen (Softcool [5.11] / Periomatic [5.12] / ADICOOL [5.13]) bzw. solche, die den Wärmetauscher berieseln (Menerga [5.3]). Damit die Wirkung dieser Systeme optimal genutzt werden kann, darf die Verweildauer der Abluft im Wärmetauscher nicht zu kurz gewählt werden (gemäss [5.11] > 0.25 sec).

Die Kosteneinsparung für elektrische Energie beträgt, bei einem Strompreis von Fr. -20 /kWh, pro Jahr ca. Fr. -40 /m<sup>2</sup>. Unter der Annahme, dass der Wasserverbrauch gleich gross ist wie beim Einsatz einer Kältemaschine, können mit diesem Betrag knapp die zusätzlichen Unterhaltskosten abgedeckt werden. Das heisst, aus wirtschaftlichen Überlegungen ist der Einsatz von parallel zu einer Kälteanlage betriebenen adiabatischen Kühlsystemen nur sinnvoll, wenn dadurch Investitionskosten-Einsparungen möglich sind.

## Investitionen und Betrieb

Die Angaben zu Investitionen und Betrieb beruhen auf Vorschlägen der Firma ORION AL-KO für eine Anlage, wie sie den Berechnungen zugrunde liegt und im Rahmen der Messungen untersucht wurde. Sie weist einen Luftvolumenstrom von max. 13'000 m<sup>3</sup>/h auf. Beim WRG-Rotor wurde mit einem nicht hygroskopischen Rotor gerechnet.

### Platzbedarf

Bei den WRG Systemen ist das kreislaufverbundene WRG-System am flexibelsten. Die Länge von Abluft- und Zuluftgerät ist jedoch etwas grösser als bei einem WRG-Rotor. Der Platzbedarf für einen Plattentauscher ist am grössten (zusätzlich 2 m · ca. 1.5 m).

Bei den Befeuchtungssystemen braucht der Kaldampfgenerator am meisten und der Kontaktbefeuchter am wenigsten Platz (- 0.9 m). Der Luftwäscher liegt dazwischen.

Ob eine Zuluft-Befeuchtung für lufttechnische Anlagen in Bürogebäuden notwendig ist, ist heute umstritten. Wenn eine minimale Zuluftbefeuchtung gewünscht wird, kann bei einem Luftaufbereitungs-System mit zwei Rotoren (Enthalpiewand und sensibler Wärmetauscher) auf den Zuluft-Befeuchter verzichtet werden, was Platz- und Kosteneinsparungen mit sich bringt.

Wie ausschlaggebend die Abmessungen eines Luftaufbereitungsgerätes sind, hängt stark von den räumlichen Verhältnissen ab und kann darum nicht allgemein beurteilt werden.

### Kosten

Tabelle 5-7 zeigt die möglichen Minder-Investitionen für eine adiabatische Abluft-Kühlung bei folgenden Randbedingungen:

- Als Grundlage wurde eine Anlage mit einer Kältemaschine sowie ein WRG-System, welches für den Winterfall sowieso notwendig ist, verwendet.
- Der Kaldampfgenerator ist so dimensioniert, dass er die Abluft 100 % sättigt, jedoch nicht übersättigt.
- Die Reduktion der notwendigen Kühlleistung wurde auf Außenluftbedingungen von 32 °C / 40 % r.F. und Abluftbedingungen von 26 °C / 50 % r.F. bezogen.

WRG-System	Kosten [Fr.]
Plattentauscher	30'000.-
Kreislaufverbund	70'000.-
Rotor	32'000.-

**Tabelle 5-5:**  
Kosten für Wärmerückgewinnung (ohne MSR-Aufwand, Basis 1995)

Befeuchtungs-System	Kosten [Fr.]
Kaldampfgenerator	23'000.-
Luftwäscher	28'000.-
Kontaktbefeuchter	18'000.-

**Tabelle 5-6:**  
Befeuchtungssystem (ohne MSR-Aufwand, Wasseraufbereitung und -zuführung, Basis 1995)

WRG-system	Befeuchtungs-system	Red. der Kühl-leistung [kW]	Red. Invest.-kosten* [Fr.]
Platten-tauscher	Kaltdampf	43	- 38'000.-
	Luftwascher	38	- 23'000.-
	Kontakt	35	- 32'000.-
Kreislauf-verbund	Kaltdampf	44	- 39'000.-
	Luftwascher	40	- 30'000.-
	Kontakt	38	- 35'000.-
1 Rotor (sensibel)	Kaltdampf	47	- 46'000.-
	Luftwascher	42	- 30'000.-
	Kontakt	39	- 39'000.-
2 Rotoren (ohne ZUL-befeucht.)	Kaltdampf	47	- 33'000.-
	Luftwascher	42	- 25'000.-
	Kontakt	39	- 21'000.-

**Tabelle 5-7:**  
Minderinvestitionen mit adiabatischer Kühlung

\*gegenüber Investitionen für Kälteanlage: Fr. 1'500.-/kW

- In diesen Kosten nicht berücksichtigt sind:
  - die für alle Systeme notwendige Wasser- aufbereitung
  - der zusätzlich notwendige Platzbedarf
- Die Investitionskosten pro kW-Kälte sind ge- rechnet für die Erweiterung einer geplanten Kälteanlage. Sie sind zu hoch, wenn aus an- deren Gründen bereits eine Kälteanlage vor- handen ist und nur das Leitungsnetz ange- passt werden muss bzw. eventuell zu tief, wenn eine separate Anlage eingebaut wer- den muss.

Auf eine Behandlung des Umwälzwassers mit UV-Strahler sollte verzichtet werden, da diese über die ganze Kühlperiode in Betrieb sind und somit einen wesentlichen Teil der notwendigen Hilfsenergie verbrauchen. Energetisch besser ist der Zusatz von Silber-Ionen (AquaPlus/ORION AL-KO [5.7]).

Der Wasserverbrauch liegt bei 20 % Abschläm- Menge je nach Rückkühlzahl im Bereich von 2.2 - 2.6 kg pro kWh nutzbarer Kühlenergie.

### *Unterhalt*

Der Unterhalt liegt bei allen Befeuchtungs-Sys- temen in der gleichen Größenordnung. Wobei mit dem Kaltdampfgenerator noch wenig Erfahrun- gen vorliegen.

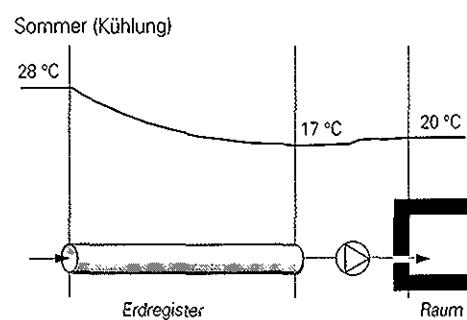
### *Literaturhinweise*

- [5.1] H.-P. Krüttli: Einsparung elektrischer Energie in lufttechnischen Anlagen mit adiabati- scher Kühlung, BEW, Juni 1995
- [5.2] G. Zweifel, J. Tscherky, HP. Krüttli: Energie- einsparung durch adiabatische Kühlung, 8. Schweiz. Status Seminar 1994 "Energiefor- schung im Hochbau"
- [5.3] A. Ney: Adiabatische Kühlung - Klimatisie- rung mit Verdunstungskühlung, Klima Kälte Heizung, Nr. 7/1992
- [5.4] G. Zweifel, A. Wirz: Adiabatische Kühlung, Industrielle Betriebe der Stadt Zürich/Amt für technische Anlagen und Lufthygiene/ ZTL Horw, 1996
- [5.5] U. Steinemann/HP. Krüttli: Luftgeschwin- digkeiten in lüftungstechnischen Anlagen, SI+A, Nr. 9/1995
- [5.6] Regierungsrat des Kanton Zürich: Verord- nung über die ordentlichen technischen und übrigen Anforderungen an Bauten, An- lagen, Ausstattungen und Ausrüstungen BBV 1 (Verordnung 700.21), April 1994
- [5.7] Fa. ORION AL-KO, CH-8957 Spreitenbach: Unterlagen über "AquaPlus 50"
- [5.8] BARCOL AIR AG, CH-8712 Stäfa: Unterla- gen über "RED-Kühldecken"
- [5.9] H. Gasser: Befeuchtung mit dem Kaltdampf- generator, Luft- und Klimatechnik, Nr. 2, 1994
- [5.10] E. Ochsner: Befeuchten und Kühlen mit Kaltdampfgenerator, Heizung Klima, Nr. 9, 1994
- [5.11] Fa. Polybloc, CH-8404 Winterthur: Unterla- gen über kältemittelfreies Kühlsystem „Softcool“
- [5.12] Fa. LSG, CH 8636 Wald: Unterlagen über Verdunstungskühl-System Perimat
- [5.13] Fa. Seven Air, CH 6000 Luzern: Unterlagen über kältemittelfreies Kühlsystem "ADI- COOL"

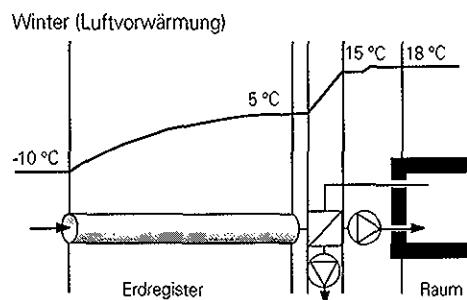
## 6. Luftansaug-Erdregister

Luftansaug-Erdregister dienen in erster Linie zur Vorkonditionierung der Aussenluft im Sommer. Die Aussenluft wird über ein unterirdisches Kanalsystem der Lüftungsanlage zugeführt. Das Erdreich dient dabei als Speichermasse, die sowohl saisonal wie auch im Tagesverlauf ausgleichend wirkt. Dem Kühleffekt im Sommer steht eine entsprechende Luftvorwärmung im Winter gegenüber. Der Hauptnutzen besteht allerdings im Sommer, da die Luftvorwärmung im Winter die Wirkung des Abluftwärmetauschers reduziert. Von grossem Vorteil ist jedoch die Frostfreiheit des Wärmetauschers, welche eine einfache Betriebsweise ohne Abtauvorgänge ermöglicht.

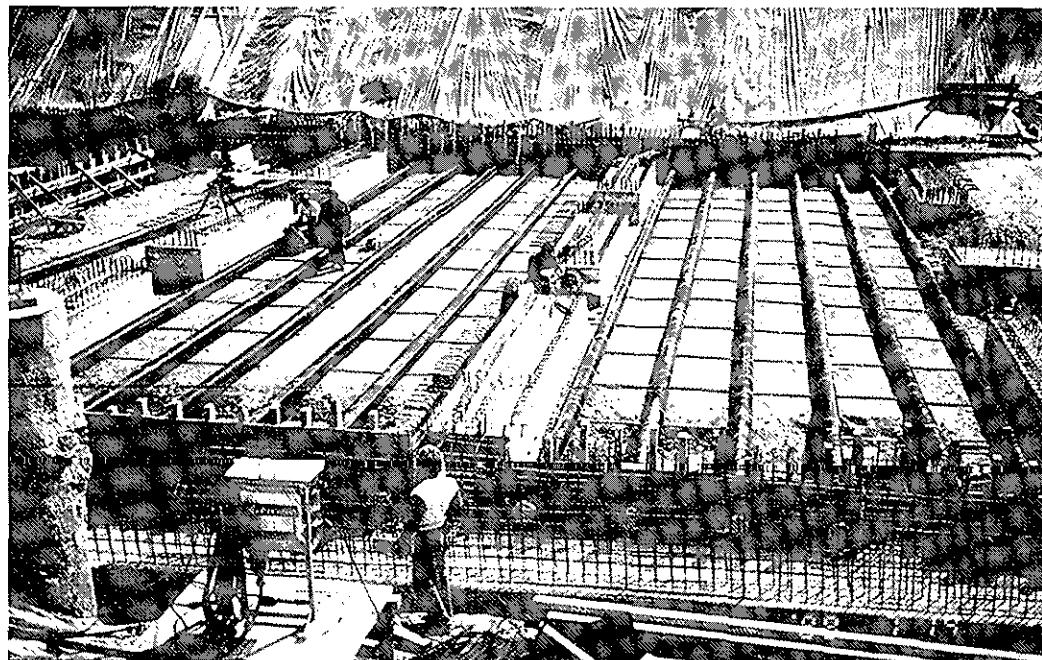
Erdregister können sinnvollerweise nur in Klimata eingesetzt werden, welche grössere Temperaturdifferenzen zwischen Sommer und Winter sowie zwischen Tag und Nacht aufweisen. Figur 6-3 zeigt die Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit von der mittleren Jahrestemperatur. Der interes-



Figur 6-1:  
Typische Betriebssituationen  
für ein Luftansaug-Erdregister  
(Temperaturen vom Luftp-  
saug bis zum Raumeintritt)

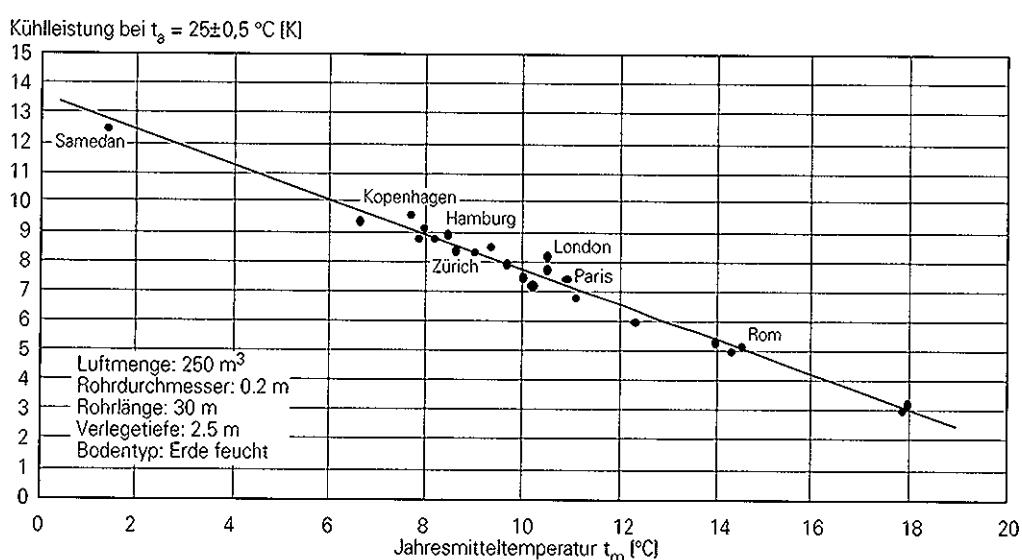


Figur 6-2:  
Grosses Luftansaug-Erdregi-  
ster [6.3] während dem Bau.  
Die Rohre werden verlegt,  
bevor die Bodenplatte  
gegossen wird.



santeste Bereich liegt im gemässigten Klima Mitteleuropas. Bei sehr warmen Standorten nimmt die Leistungsfähigkeit ab, währenddem bei kühlen Standorten in der Regel nur ein geringer Kühlbedarf vorhanden ist.

**Figur 6-3:**  
Abhängigkeit der Erdregisterleistung von der mittleren Jahrestemperatur am Gebäudestandort (Mittelwerte bei Außentemperaturen um 25 °C, Dauerbetrieb)



### Systemwahl

Die Planungsrichtlinien sollen dazu dienen, typische Anwendungen dimensionieren und konstruktiv richtig konzipieren zu können. Die Auslegung des Erdregisters erfolgt dabei primär für den Sommerfall. Die durchgeföhrten Berechnungen wurden mit dem WKM\_LTe-Programm [6.2] durchgeführt.

Bei anspruchsvollen Planungsaufgaben empfiehlt es sich, eigene Berechnungen mit dem WKM\_LTe-Programm oder einem anderen durchzuföhrn (z.B. [6.6]).

Grundsätzlich eignen sich Luftsaug-Erdregister sowohl zur selbständigen Kühlung der Raumluft, wie auch als Ergänzung zusätzlicher Raumkühlsysteme. Da das Erdreich lediglich die Außenluft vorköhlt, kann die Zuluft im Prinzip durch weitere Massnahmen weiter abgeköhlt werden oder es kann dem Raum Wärme durch statische Kühlflächen (Kühldecken, Bauteilkühlung) entzogen werden. Interessante Kombinationsmöglichkeiten sind:

- Erdregister – natürliche Nachtluftkühlung
- Erdregister – mechanische Nachtkühlung
- Erdregister – Bauteilkühlung/Kühldecke

Weniger geeignet sind Kombinationen mit adiabatischen Systemen (Verdunstungskühlung), da das Erdregister diesen nachgeschaltet werden müsste. Interessant sind jedoch Kombinationen mit Erdsonden oder mit Grundwassernutzung. Falls die Möglichkeit besteht, wäre es jedoch in der Regel wirtschaftlicher, diese Systeme monovalent, d.h. ohne Erdregister, zu betreiben.

Für die Auslegung des Erdregisters können drei unterschiedliche Betriebsweisen unterschieden werden.

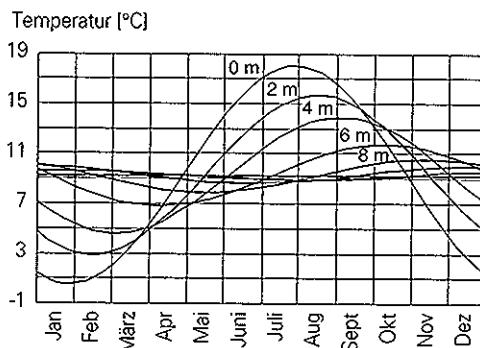
Betriebsweise	Temperaturen	Leistungen
Komfortkühlung		Kühlung bei 25 °C      8.3 K Jahresertrag      1138 kWh Betriebsstunden      8760 h
ungeregelt		Kühlung bei 25 °C      8.6 K Jahresertrag      558 kWh Betriebsstunden      926 h
Raumkühlung		Kühlung bei 25 °C      9.3 K Jahresertrag      873 kWh Betriebsstunden      4380 h
temperaturgeregt Betrieb bei $t_a > 19^{\circ}\text{C}$		
Hilfskühlung		
Regelung durch Hauptkühlsystem hier: 06.00-18.00 Uhr		

Figur 6-4:  
Übersicht über typische Einsatzgebiete für Erdregister  
(Zürich, 1 Rohr, 250 m<sup>3</sup>/h, Durchmesser 0.2 m, Länge 30 m, Verlegetiefe 2.5 m)

- **Komfortkühlung:** Das Erdregister wird nur zur Komfortverbesserung ohne definierte Kühlleistung eingesetzt. Typische Anwendungen sind Quellluftsysteme für Bürogebäuden mit geringen internen Lasten oder die Außenluftkonditionierung in Wohngebäuden, Atrien etc. mit mechanischer Lüftung. In beiden Fällen handelt es sich um relativ kleine Luftmengen (Luftwechsel 0.5 bis 1 h<sup>-1</sup>), wobei vor allem wichtig ist, dass die Zulufttemperatur unter der Raumlufttemperatur liegt. Luftansaug-Erdregister können diese für Quellluftsysteme wichtige Forderung auf einfache Weise erfüllen. Die Austrittstemperatur aus dem Erdregister ist eigentlich immer kühler als die Raumluft, sofern der Raum nicht anderweitig gekühlt wird. Die Raumlufttemperatur muss jedoch an heißen Tagen ansteigen dürfen. Mit zunehmender Außenlufttemperatur nimmt die Erdregisterleistung überproportional zu, da sich die Temperaturdifferenz zwischen Erdreich und Außenluft vergrössert. Das Erdregister ist deshalb recht gut geeignet, externe Lasten effizient abzuführen.
- **Raumkühlung:** Das Erdregister dient zum Abführen interner Lasten über das Lüftungssystem. Sobald interne Wärmelasten aus dem Raum abgeführt werden müssen, sind grössere Luftvolumenströme erforderlich. Die Kühlleistung richtet sich in erster Linie nach der Aussentemperatur und dem Zustand des Erdreichs. Bei konstantem Betrieb kann sich die Kühlkapazität des Erdreichs erschöpfen. Allein ist es deshalb kaum in der Lage, konstant grössere interne Lasten abzuführen. Erfahrungswerte liegen bei etwa 30 bis 50 Wh/(m<sup>2</sup>·d) und einem stündlichen Luftwechsel von ca. 2. Sobald die Aussentemperatur unter 19 °C sinkt (z.B. nachts), sollte über einen By-pass direkt Außenluft angesogen und der Luftwechsel bis gegen 4 h<sup>-1</sup> angehoben werden. Diese Betriebsweise erlaubt es dem Erdregister, sich wieder zu erholen.
- **Unterstützungskühlung:** Das Luftansaug-Erdregister kann ein vorhandenes Kühlsystem unterstützen. Grössere Wärmelasten lassen sich durchaus abführen, wenn das Erdregister in Kombination mit andern Kühlsystemen betrieben wird. Vorhandene Kältemaschinen könnten beispielsweise bei Bedarf zur Spitzendeckung eingesetzt werden. Es ist jedoch zu bedenken, dass in der Regel weder tiefe Zulufttemperaturen (Komfort) noch grosse Luftvolumenströme (hohe Transportenergie) erwünscht sind. Bei höheren Kühlleistungen werden deshalb Luftsysteem und Kühlsystem mit Vorteil getrennt. Über das Erdregister wird der Raum mit genügend Außenluft versorgt, ohne die Wärmelast im Raum zu erhöhen, während die im Raum vorhandene Wärmelast über statische Kühlflächen abgeführt wird. Bei ca. 150 bis 200 Wh/(m<sup>2</sup>·d) Wärmelast kann dies sehr gut mittels Betonkernkühlung erfolgen (vgl. Figur 3-3). Bei höheren Lasten ist eine mechanisch gekühlte Kühldecke kaum mehr zu umgehen.

## Systemdefinition

**Figur 6-5:**  
Erdreichtemperaturen in verschiedenen Tiefen für den Standort Zürich. Eine Verlegetiefe von 2 bis 4 m ist für Lufthaus-Erdregister empfehlenswert. Infolge der Trägheit des Erdreichs ist in dieser Tiefe die Erreichtemperatur auch im Juli noch verhältnismässig tief.



**Tabelle 6-1:**  
Eigenschaften verschiedener Böden. Der Einfluss auf den Kühlleffekt von ca.  $\pm 10\%$  ist verhältnismässig gering.

Bodentyp	$\lambda$ [W/(m·K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	c [J/(kg·K)]	Kühlung [%]
Feuchte Erde	1.5	1400	1400	100
Trockener Sand	0.7	1500	920	90
Feuchter Sand	1.88	1500	1200	98
Feuchter Lehm	1.45	1800	1340	104
Nasser Lehm	2.9	1800	1590	105

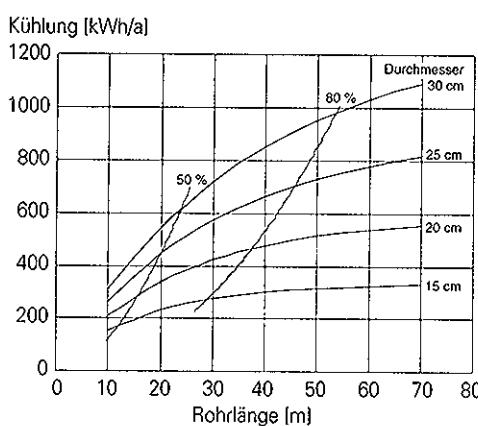
**Figur 6-6:**  
Einfluss der Rohrlänge auf die Kühlleistung. 80 % der theoretisch möglichen Leistung sind in der Regel ideal für die Auslegung des Registers. Falls vor dem Rohrregister ein erdverlegter Sammelkanal angeordnet ist, sollte dessen Einfluss mitberücksichtigt werden.

Annahmen:  
Klima: Zürich

Luftgeschwindigkeit: 2 m/s

Verlegetiefe: 2.5 m

Bodentyp: naturfeucht



## Lage

Eine möglichst tiefe Verlegung des Erdregisters ist anzustreben. Figur 6-5 zeigt die Erdreichtemperaturen in Abhängigkeit zur Tiefe und Jahreszeit. Der für das Erdregister erforderliche Aushub bestimmt jedoch die Baukosten wesentlich, weshalb es in der Regel zu teuer ist, für das Erdregister grössere Aushubarbeiten auszuführen. Typische Anordnungen des Registers sind:

- parallele Verlegung direkt unter der Fundamentplatte oder zwischen den Einzel- und Streifenfundamenten,
- Verlegung in der Baugrube um das Gebäude,
- Verlegung in Gräben im Garten.

Der Rohrabstand sollte ca. 1.00 m betragen. Bei geringeren Abständen ist die gegenseitige Beeinflussung der Rohre zu gross. Grössere Abstände sind für die täglichen Entladungszyklen nicht notwendig.

Bei einer Anordnung unter einem Gebäude ist darauf zu achten, dass die Kellerräume kalt sind. Bei einem beheizten Kellergeschoss würden selbst bei guter Isolation ( $U \approx 0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) rund 40 kWh/m<sup>2</sup> Wärme pro Jahr ins Erdreich abfließen und dieses erwärmen.

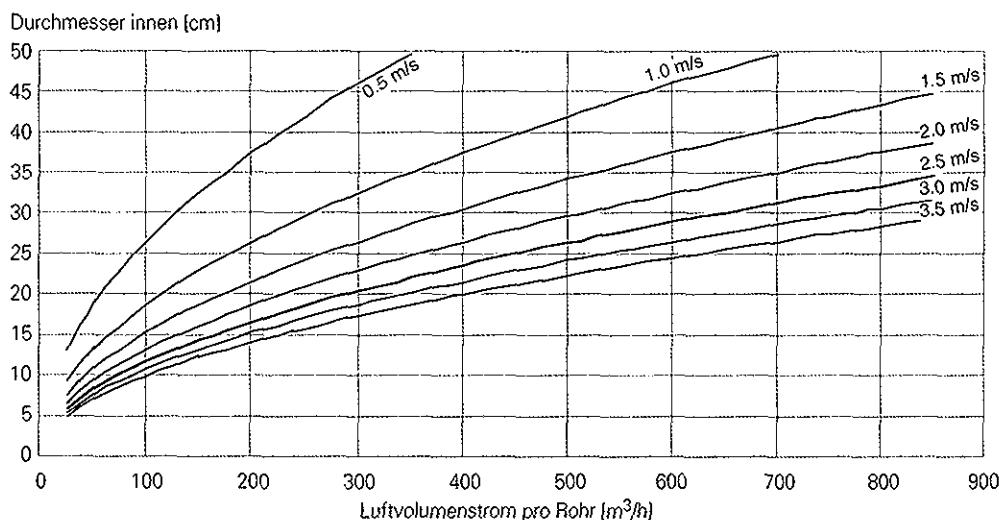
Von Vorteil sind schwere, feuchte Böden. Grundwasser erfordert allerdings relativ aufwendige Dichtungsarbeiten und verändert die Eigenschaften des Bodens nicht grundlegend (vgl. Tabelle 6-1).

## Grösse

Die erforderliche Grösse des Erdregisters bestimmt sich anhand der geplanten Luftvolumenströme und des verfügbaren Raumes. Kleinere Anlagen, z.B. zur Komfortverbesserung im Wohnbau, können relativ günstig erstellt werden. Vor allem die Luftein- und -austlässe sind sehr einfach zu gestalten. Grössere Anlagen und solche im Grundwasser sind schon wesentlich aufwendiger, da die Luftein- und -austritte praktisch nur über grössere Verteilschächte erfolgen können.

Die Grösse des Erdregisters ist anhand des erforderlichen Luftvolumenstroms zu dimensionieren, wobei auch hier aus Gründen des Druckverlustes Luftgeschwindigkeiten von ca. 2 m/s anzustreben sind. Bei den üblicherweise verwendeten Kunststoffrohren mit 20 cm Durchmesser sind dies etwa 250 m<sup>3</sup>/h pro Rohr. Genaue Werte können der Figur 6-7 entnommen werden. Die optimale Rohrlänge richtet sich nach dem

Rohrdurchmesser und der Luftgeschwindigkeit. Große Rohrdurchmesser sind nur bei sehr langen Rohren sinnvoll. Vor allem aber sind bei langen Rohren die Dilatationsbewegungen verstärkt zu berücksichtigen (siehe Konstruktionshinweise).



Figur 6-7:  
Diagramm zur Bestimmung  
des Luftvolumenstromes  
durch Erdregisterrohre

### Betriebsweise

Die Betriebsweise richtet sich in erster Linie nach der Anwendungsart. Auf komplizierte Regelstrategien sollte jedoch möglichst verzichtet werden. Für die drei typischen Anwendungen können folgende Betriebsweisen empfohlen werden.

- **Komfortkühlung:** Die Luft wird vorteilhafterweise immer über das Erdregister geführt. Die Lüftungsanlage bestimmt Luftvolumenstrom und Betriebszeit. Die Regeneration des Bodens erfolgt bei kühlen Außentemperaturen. Die Luft verlässt zu diesen Zeiten das Erdregister etwas erwärmt, was wegen der ohnehin tiefen Außentemperaturen kein Problem sein sollte.
- **Raumkühlung:** Falls interne Wärmelasten abzuführen sind und das Erdregister eine maximale Raumtemperatur gewährleisten muss, sollte das Erdregister wenn immer möglich geschont werden. Im einfacheren Fall sollte bei Außentemperaturen unter 19 °C die Außenluft über einen By-pass direkt angesogen werden. Bei vorhandenem Gebäudeleitsystem kann dies auch bei einer definierten Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenluft erfolgen (z.B.  $\Delta T > 5$  K). Da zu diesen Zeiten kühle Außenluft unbeschränkt zur Verfügung steht, wird bei Außenluftbetrieb der Luftvolumenstrom bis

zu einem 4-fachen Luftwechsel erhöht. Es ist durchaus möglich, dass dabei die größere Wärmemenge im Außenluftbetrieb abgeführt wird, währenddem das Erdregister nur tagsüber zur Spitzendeckung dient.

- **Unterstützungskühlung:** Auch bei der Unterstützungskühlung ist ein Dauerbetrieb des Erdregisters empfehlenswert. Die Regelung des Kühlleistung sollte über das ergänzende System erfolgen. Das Erdregister wirkt primär ausgleichend, indem es Temperaturspitzen bricht, sich aber während (relativen) Kälteperioden wieder regeneriert.

## Systemauslegung

Sobald Lage, Anordnung und Betriebsweise bekannt sind, können Aussagen über die Leistungsfähigkeit des Erdregisters gemacht werden. Sowohl die maximale Leistung wie auch die Jahresleistung müssen berücksichtigt werden. Figur 6-8 und Tab. 6-2 geben eine Übersicht über den

Zusammenhang zwischen maximaler Leistung und Jahresertrag. Normalerweise wird die maximale Leistung für die Systemauslegung wichtiger sein. Die Figur 6-9 und die Tabelle 6-3 ermöglichen es, einfache Fälle zu dimensionieren. Für komplexere Fälle oder für genauere Abklärungen müssen Simulationen mit einem geeigneten Rechenprogramm durchgeführt werden [6.21, 6.6].

### Das Widerstands-Kapazitäten-Modell

Die Berechnung von Luftansaug-Erdregistern ist wegen der geometrischen Verhältnisse relativ komplex und die dynamischen Vorgänge sind schwierig zu simulieren. Gute Ergebnisse können mit dem Widerstands-Kapazitäten-Modell (WKM) [6.2] erreicht werden, welches von Arthur Huber entwickelt wurde.

Das WKM betrachtet ein einzelnes Rohr, welches mit 50 cm Erdreich ummantelt ist und durch welches eine gegebene Menge Außenluft strömt. Für die täglichen Lade- und Entladevorgänge wird nur diese 50 cm dicke Erdschicht berücksichtigt, wobei drei verschiedene Randbedingungen möglich sind:

- Ungestörtes Erdreich, dessen Temperatur aufgrund der Verlegetiefe, des Klimastandortes und der Jahreszeit berechnet wird.
- Erdreich unter einem Gebäude: Die Grenzschichttemperatur wird aufgrund der Gebäudetemperatur (z.B.  $T_{\text{Kellerboden}}$ ) und dem thermischen Widerstand zwischen Keller und Erdregister bestimmt.
- Erdreich zwischen zwei Erdregister-Rohren: Für diesen Anteil gilt eine adiabatische Situation (kein Wärmefluss in diesen und aus diesem Bereich). Nur die Speicherkapazität des Erdreichs wird berücksichtigt.



Das WKM-Programm kann mit einem elektrischen Schaltkreis, bestehend aus Widerständen und Kondensatoren, verglichen werden. Die Anteile des Erdreichs der drei unterschiedlichen Grenzbereiche (ungestört, gebäudenah und adiabatisch) müssen aufgrund der vorhandenen Situation geschätzt werden. Für jeden der Bereiche rechnet das Modell die Temperaturen für drei Schichten und die Rohrinnenoberfläche. Der Länge nach wird das Rohr in sechs Stücke unterteilt, wobei die Austrittstemperatur des einen Teils die Eintrittstemperatur des nächsten Teils darstellt. (Bezug: Huber Energietechnik, Zürich).

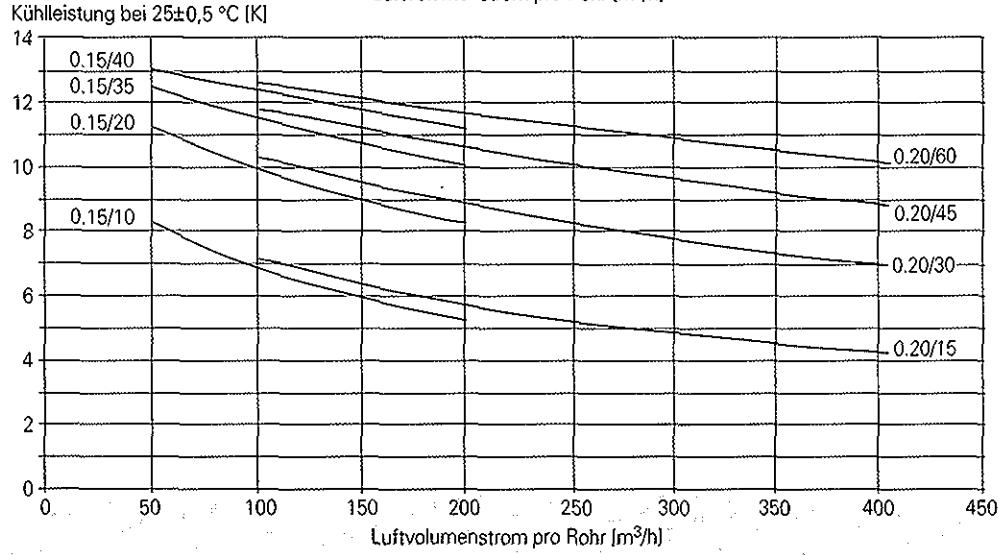
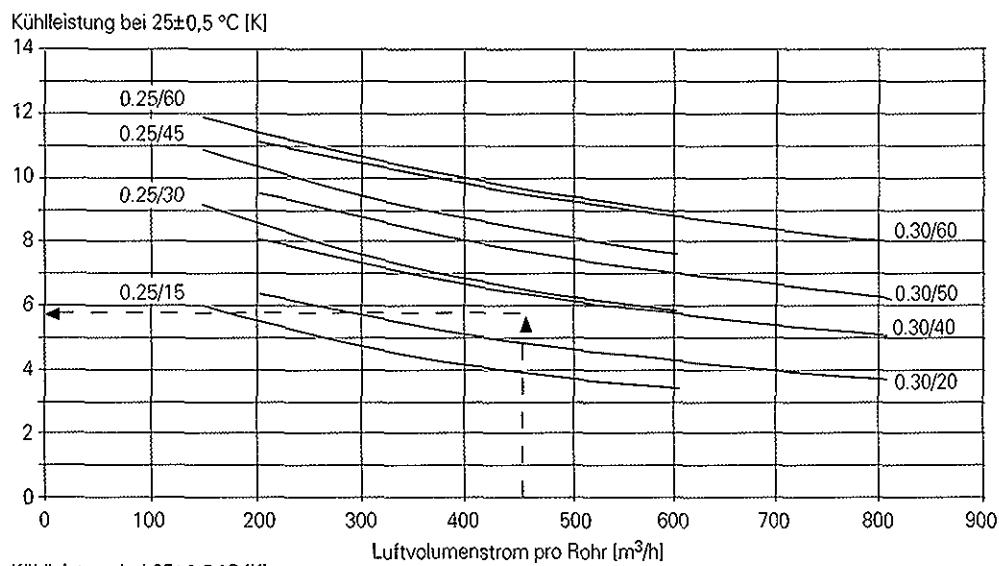
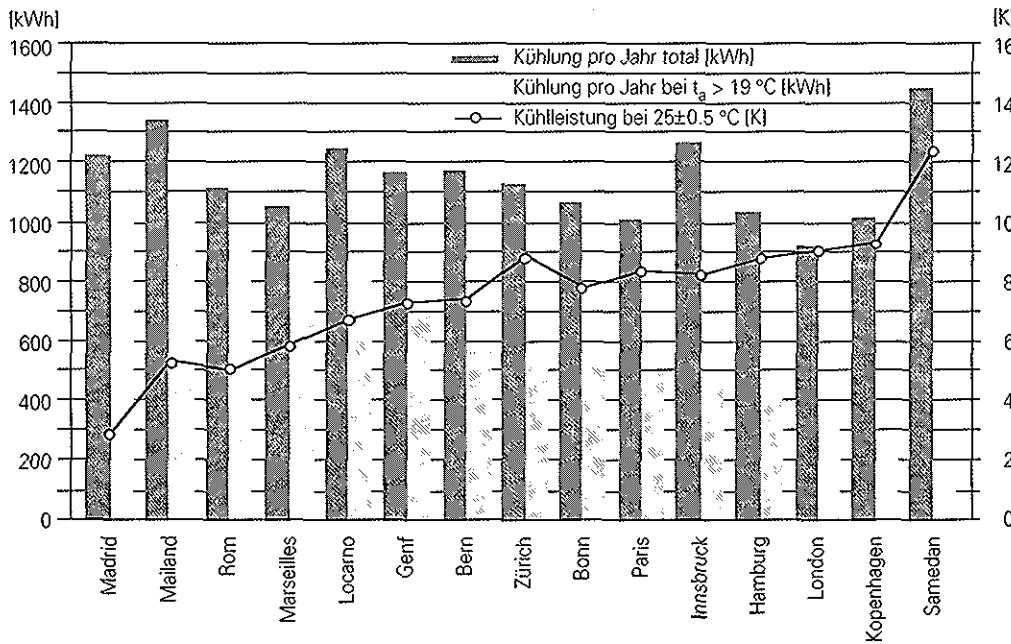
Tabelle 6-2:

Mittlere Kühlleistung in Kelvin von Luftansaug-Erdregistern für verschiedene Klimabedingungen und Standorte (Rohrlänge 30 m, Rohrdurchmesser 0.2 m, Verlegetiefe 2.5 m, Luftvolumenstrom 250 m³/h). Die Tabelle zeigt, um wieviel die Außenluft bei verschiedenen Außentemperaturen ( $\pm 0.5 \text{ K}$ ) gekühlt werden kann (Stand. Abw. = Standard-Abweichung).

Eintrittstemperatur [°C]	Jahres- mittel- temp. [°C]	Kühlleistung [K]										Betriebs- stunden
		Mittel Abw		Stand. Mittel Abw		Stand. Mittel Abw		Stand. Mittel Abw		Stand. Mittel Abw		
		15±0.5	20±0.5	20±0.5	25±0.5	25±0.5	30±0.5	30±0.5	15	20	25	30
Rom	14.5	2.2	0.9	2.4	1.6	5.1	1.2	8.2	0.9	142	308	153
Marseille	14.3	1.9	0.9	2.4	1.5	5.0	1.0	7.8	0.7	170	392	201
Madrid	13.9	2.2	0.8	2.3	1.7	5.3	1.4	8.3	0.8	173	393	164
Mailand	12.3	2.8	1.2	3.0	1.8	6.0	1.4	9.2	1.1	201	324	164
Locarno	11.1	2.7	1.6	3.9	1.5	6.8	0.9	9.9	0.6	223	299	143
Paris	10.9	2.2	1.3	4.2	1.0	7.4	0.8	10.3	-	359	244	65
London	10.5	2.0	1.2	5.0	1.0	8.3	0.7	-	-	493	198	47
Geneva	10.0	2.5	1.7	4.7	1.4	7.5	0.9	10.7	0.8	266	226	99
Bonn	9.7	1.9	1.2	5.2	1.2	7.9	0.8	11.3	-	376	240	58
Zürich	9.0	2.4	1.5	5.3	1.4	8.3	0.9	11.2	0.5	383	194	62
Bern	8.7	2.6	1.6	5.7	1.5	8.4	0.8	11.5	0.6	359	186	66
Hamburg	8.5	2.5	1.1	5.8	1.1	8.9	0.7	12.6	-	398	161	47
Innsbruck	8.2	2.8	1.7	5.9	1.4	8.8	1.1	11.7	0.4	386	187	42
Kopenhagen	7.7	3.0	1.1	6.1	0.7	9.6	0.6	-	-	449	142	24
Samedan	1.4	7.0	1.4	9.7	0.7	12.5	-	-	-	163	61	1

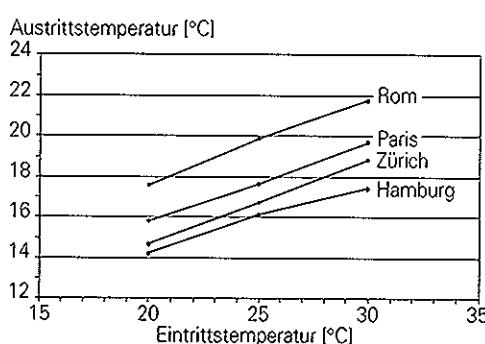
**Figur 6-8:**  
Kühlung und Kühlleistung von  
Luftansaug-Erdregistern für  
verschiedene Standorte  
(Systemdefinition siehe Ta-  
belle 6-2)

Die Graphik zeigt, dass die  
wirklich brauchbare Kühlung  
(Annahme bei  $T_a > 19^\circ\text{C}$ ) bei  
hohen Kühlleistungen ab-  
nimmt. An kühlen Standorten  
wie Samedan ist zudem zu  
beachten, dass im Winterbe-  
trieb das Erdreich in der Nähe  
des Lufteintritts gefrieren  
wird (mögliche Beeinträf-  
tigung der Fundation)



**Figur 6-9:**  
Kühlung in Abhängigkeit von  
Rohrdurchmesser, Rohrlänge  
und Luftvolumenstrom für  
Zürich, Dauerbetrieb, Verlege-  
tiefe 2.5 m (Innendurchmes-  
ser Rohr/Rohrlänge in m).  
Andere Standorte müssen  
mit Tabelle 6-3 korrigiert  
werden.

**Figur 6-10:**  
Abhängigkeit der Kühlwirkung von Eintrittstemperatur und Gebäudestandort (Rohrlänge 30 m, Durchmesser 0.2 m, Verlegetiefe 2.5 m, Luftvolumenstrom 250 m<sup>3</sup>/h)



**Tabelle 6-3:**  
Korrekturfaktoren zur Bestimmung der Kühlleistung bei 25 °C für verschiedene Klimata (Jahresmitteltemperatur), Verlegetiefe im Erdreich und Bodentypen

Jahres- mittel- temp. [°C]	Korr.- faktor [%]	Verlege- tiefe [m]	Korr.- faktor [%]	Boden- typ	Korr.- faktor [%]
5	129	7	117.5	Lehm nass	105
6	122	6	117		
7	115	5	116	Lehm	
8	108	4	112	feucht	104
9	101	3.5	109	Erde	
10	94	3.0	105	feucht	100
11	87	2.5	100	Sand	
12	90	2.0	94	feucht	98
13	73	1.5	87	Sand	
14	66	1.0	79	trocken	90

### Berechnungsbeispiel

4-geschossiges Bürogebäude, 25 · 16 m, Bruttogeschoßfläche 1'600 m<sup>2</sup>

Luftvolumenstrom entsprechend einem Luftwechsel von 2/h (Sommer): 10'240 m<sup>3</sup>

Anzahl Erdregisterrohre: 20, Durchmesser 30 cm, 16 m lang (15 Rohre mit Durchmesser 35 cm sind weniger günstig)

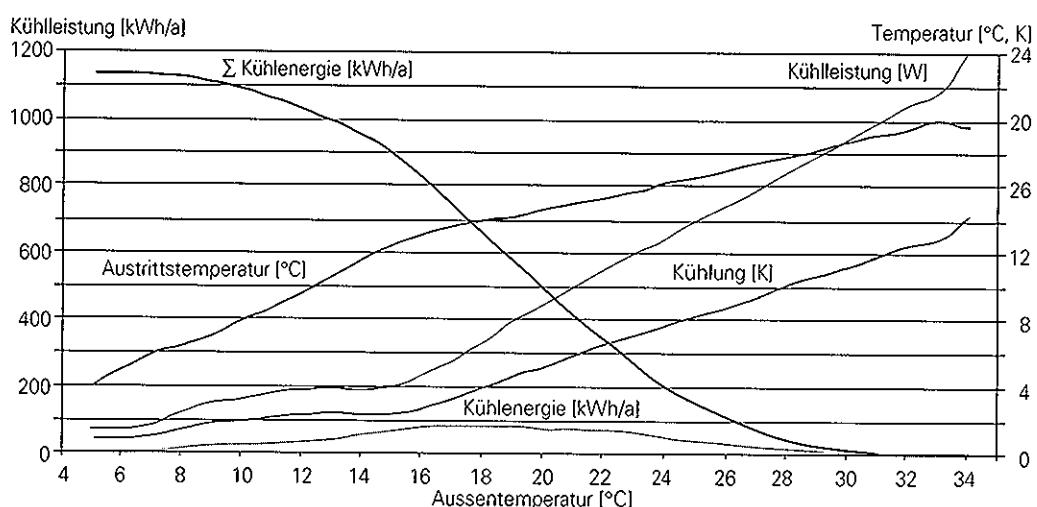
Verteil- und Sammelkanäle: Betonschächte, 25 m lang, 1.8 m · 0.8 m, diese entsprechen in ihrer erdberührten Abwicklung je ca. 100 m zusätzlichen Rohren. Ihre Kühlwirkung wird durch eine fiktive Verlängerung um 10 m auf 26 m berücksichtigt. Kühlung der Außenluft bei 25 °C um 5.8 K auf 19.2 °C (Fig. 6-9).

Falls das Gebäude z. Bsp. in London steht (Jahresmitteltemperatur 10.5 °C), kann die Kühlleistung gemäss Tabelle 6-3 korrigiert werden. Dies ergibt eine korrigierte Leistung von  $0.9 \times 5.8 \text{ K} = 5.22 \text{ K}$ . Falls die Rohre 4 m unter gewachsenem Terrain verlegt sind, kann eine zweite Korrektur mit dem Faktor 1.12 (auch gemäss Tabelle 6-3) vorgenommen werden. Eine Korrektur des Bodentyps macht praktisch nur bei extrem trockenem oder nassem Erdreich Sinn. Der berechnete Kühlleffekt wird hier also 5.85 K betragen, was eine Kühlleistung von  $512 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 5.85 \text{ K} \cdot 0.32 \text{ Wh}/(\text{m}^3 \cdot \text{K}) \approx 980 \text{ W}$  pro Rohr oder total ca. 19 kW ermöglicht.

Schlussfolgerung: Das Luftsaug-Erdregister kann ca. 12 W/m<sup>2</sup> BGF abführen. Falls die interne Last 25 W/m<sup>2</sup> (40 kW total) beträgt, kann die Überschusswärme noch leicht im Gebäude gespeichert und durch zusätzliche Nachtlüftung abgeführt werden.

Eine Kombination von Luftsaug-Erdregistern und Nachtlüftung können gemeinsam einen guten Komfort sicherstellen, wogegen beide Systeme allein häufig Mühe haben, die Komforttemperatur von 26 °C zu garantieren.

**Figur 6-11:**  
Abhängigkeit von Kühlleistung und Kühlenergie von der Außentemperatur (Zürich, 250 m<sup>3</sup>/h, Rohrdurchmesser 0.2 m, Rohrlänge 30 m, Verlegetiefe 2.5 m, Boden naturfeucht). Die Summenkurve gibt an, wieviel Kühlenergie ab einer bestimmten Einschalttemperatur erwartet werden kann.



## Konstruktions-hinweise

### Lufteintritt

Der Lufteintritt ist für die Qualität der Zuluft massgebend. Nebst Verschmutzung durch Kleintiere, Kinder, Flugpartikel etc. ist auch die Luftqualität beim Ansaug von grosser Bedeutung. Ein vom Boden erhöhter Ansaug verhindert das Eintreten von Radon-Gasen, die überall aus dem Boden austreten können, reduziert die Konzentration eventueller Autoabgase und senkt in der Regel auch die Ansaugtemperatur. Vor allem aus letztem Grund sind Ansaugstellen über stark besonnten Gebäudeteilen resp. asphaltierten Außenflächen zu vermeiden. Eine (geruchslose) Begrünung um den Ansaug kann die Ansaugtemperatur merklich senken.

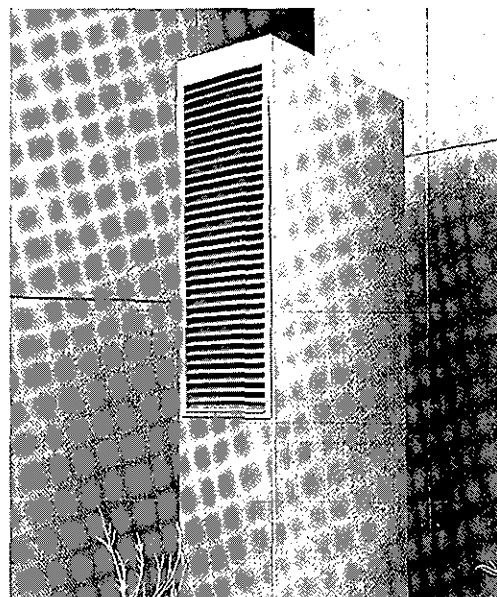
Der Verschmutzung muss einerseits durch erschwerten Zugang, andererseits mit einem dicht schliessenden Maschengitter begegnet werden. Filter sind nur zu empfehlen, wenn auch die regelmässige Kontrolle und Wartung sichergestellt werden kann. Grob- und vor allem Feinfilter sind jedoch in der Lage, nichtflüchtige Luftfremdstoffe wie Pollen, Pilzsporen oder Bakterien effizient herauszufiltern. In professionell gewarteten Anlagen ist diese Option zu prüfen.

### Verteil- und Sammelkanal

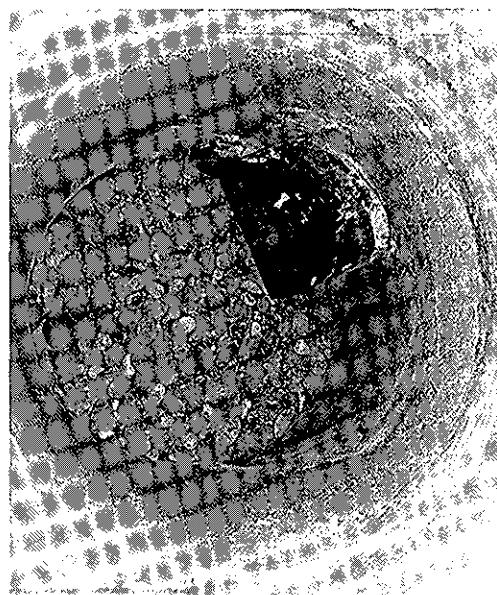
Die Zuführung der Luft zu den Erdregisterrohren erfolgt bei grösseren Anlagen über einen Verteilkanal. Dieser soll genauso wie der Sammelkanal grosszügig dimensioniert sein, damit für alle Erdregisterrohre ähnliche Druckverhältnisse entstehen. Dadurch wird sichergestellt, dass alle Rohre die gleichen Luftpunkte führen.

Verteil- und Sammelkanäle sollen begeh- oder wenigstens bekriechbar sein, um bei Bedarf von hier aus das Erdregister kontrollieren und gegebenenfalls reinigen zu können. Beide Schächte sind grundsätzlich luftdicht und mit einem Ablauf versehen (mit Siphon) auszuführen. Vor allem der Ablauf des etwas tiefer liegenden Verteikanals (Lufteintritts-Seite) ist wichtig, um Kondensat und allfällig eindringendes Grundwasser oder Reinigungswasser ableiten zu können.

Vorteilhaft sind massive, betonierte Verteilschächte. In diesen kann sich die Außenluft bereits etwas abkühlen oder im Winter vorwärmen. Vor allem bei Erdregistern, die direkt unter dem Gebäude liegen, kann damit die Frostfreiheit gewährleistet werden. Jedenfalls sollte der Verteikanal möglichst unabhängig vom Gebäude und von Erdreich umgeben sein.



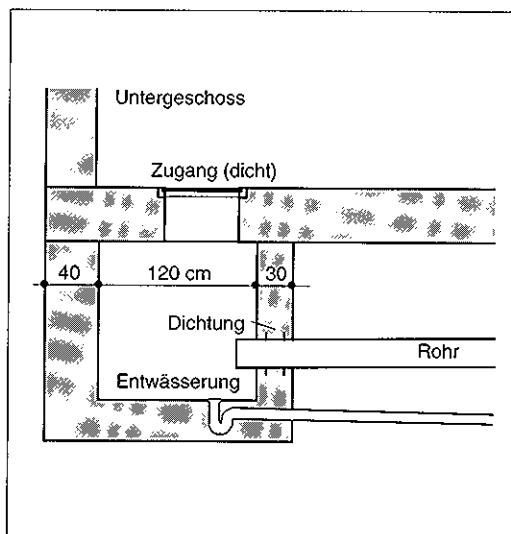
Figur 6-12:  
Luftansaug über Boden für ein mittelgrosses Erdregister. Hier können bereits Grobstaubfilter eingesetzt werden



Figur 6-13:  
Luftansaug über Schacht für ein kleines Erdregister. Hier muss darauf geachtet werden, dass kein Radongas aus dem Erdreich in den Schacht eintritt. Insofern kann die Sickerpackung wie hier problematisch sein.

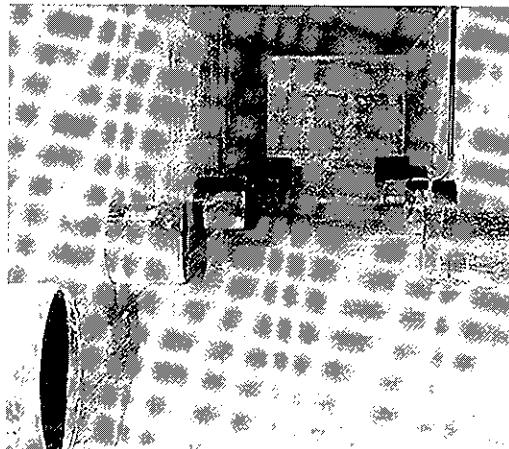
Figur 6-14:

Schnitt durch Verteilkanal eines grösseren Erdregisters.  
Die Rohre müssen die notwendige Dilatation erlauben.



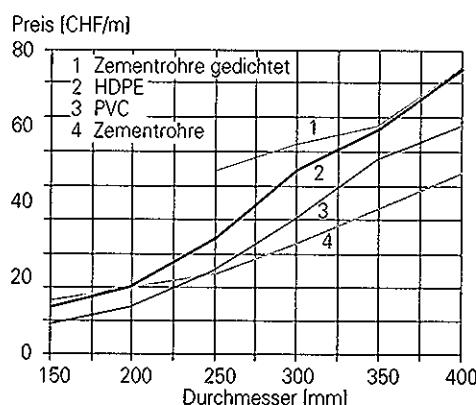
Figur 6-15:

Blick in den Sammelkanal eines Luftansaug-Erdregisters  
(Bürohaus Basler & Hofmann,  
Esslingen)



Figur 6-16:

Preissituation für verschiedene Rohrmaterialien. Generell sind kleine Rohrdurchmesser wirtschaftlicher und thermisch effizienter.



## Register

Für das Erdregister werden praktisch ausschliesslich runde Rohre aus Kunststoff, Zement oder Faserzement eingesetzt. Die Materialwahl ist primär eine Kostenfrage. Figur 6-16 zeigt die Rohrkosten in Abhängigkeit zum Durchmesser. Bei kleineren Durchmessern, bis etwa 30 cm, werden vorteilhafterweise Kunststoffrohre aus sehr dauerhaftem Hart-Polyäthylen (HDPE) oder evtl. aus PVC eingesetzt. Nur bei grösseren Durchmessern sind Zementrohre günstiger. Werden diese aber mit speziellen Dichtungen versehen, stellen sie wiederum eine teure Lösung dar. Generell sind viele kleine Rohre günstiger im Preis/Leistungsverhältnis als wenige grosse Rohre.

Da Erdregister lagebedingt schlecht saniert werden können, ist primär auf eine lange Lebensdauer zu achten (> 50 Jahre). Dünnwandige Rippenrohre resp. -schläuche sind deshalb weniger geeignet. Sie sind auch kritischer bezüglich Verschmutzung und können nur schlecht gereinigt werden.

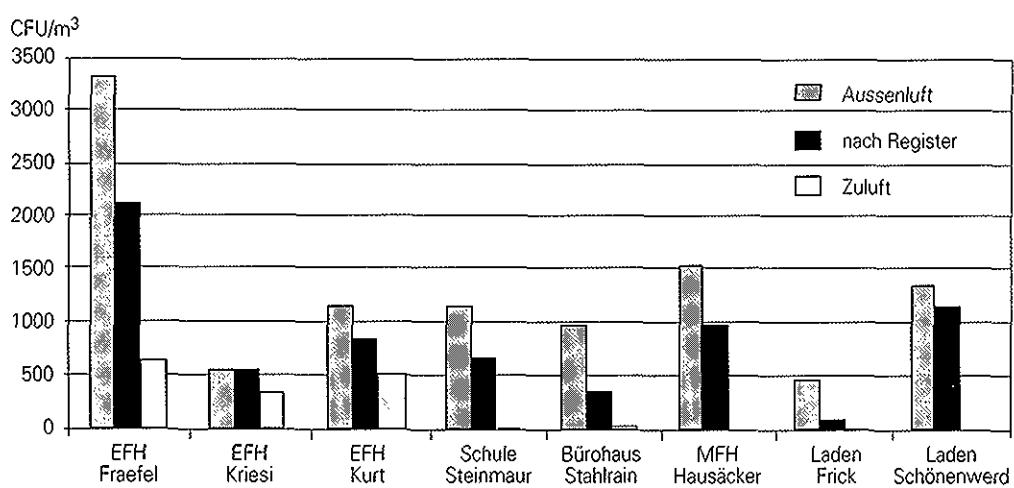
Um Kondenswasser oder allfälliges Reinigungswasser ableiten zu können, sind Erdregisterrohre mit ca. 1 % Gefälle nach aussen (gegen die Luftströmung) zu verlegen. Grundsätzlich genügt es, die Rohre in sauberen Gräben mit etwas Sand zu verlegen, bei den relativ kurzen Zementrohren kann der Boden mit etwas Magerbeton gefestigt werden.

Von Vorteil sind gerade Rohre, die leicht zu kontrollieren sind, aber auch Bogen sind möglich. Es ist vor allem zu beachten, dass das Rohr durch die Temperaturänderungen eine erhebliche Längenänderung durchmacht. Sie beträgt zum Beispiel für HDPE-Rohre  $0.2 \text{ mm}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . Diese Längenänderung muss beim Verteil- und Sammelkanal aufgenommen werden können. Üblicherweise werden hier Gummidichtungen eingelegt, die sowohl gegen eindringendes Grundwasser schützen, wie auch die Gleitbewegungen zulassen. Damit sich die Rohre mit der Zeit nicht auf eine Seite bewegen, werden sie etwa mittig einbetoniert.

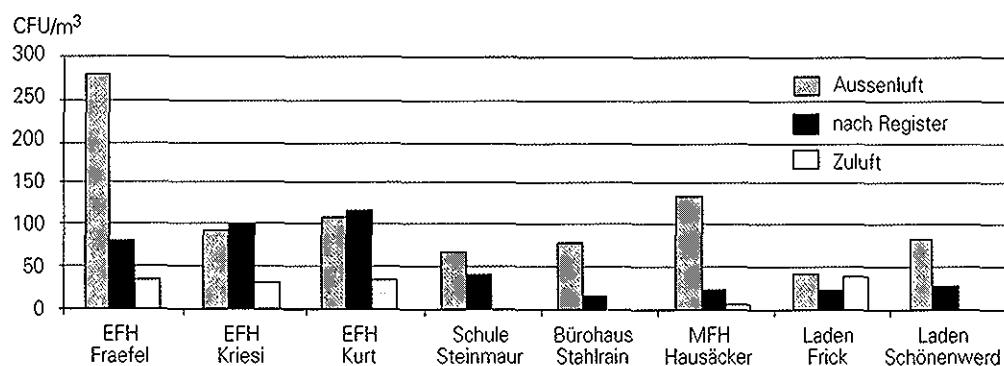
## Unterhalt

Luftansaug-Erdregister sind grundsätzlich unterhaltsarm. Eine wesentliche Verschmutzung konnte bei verschiedenen untersuchten, älteren Anlagen nicht festgestellt werden [6.7]. Es wurde auch die Konzentration der Pilzsporen und der Bakterien in der Luft gemessen. In praktisch allen Fällen war die diesbezügliche Qualität der Luft nach dem Luftansaug-Erdregister besser als in der Außenluft (Figuren 6-17 und 6-18).

Um trotzdem auf allfällige Pannen vorbereitet zu sein, empfiehlt es sich, das Erdregister zusammen mit den übrigen Lüftungskomponenten regelmässig zu kontrollieren. Im Vordergrund stehen Ansaugstelle, Schächte und Lüftungsgeräte. Besonders bei Anlagen, in welche Grundwasser eindringt, ist eine regelmässige, optische Kontrolle sicherzustellen. Bei gekrümmten Erdregisterrohren sollte – wie bei Elektro-Leerrohren – ein nicht korrodierender Draht eingezogen werden. Mit diesem können bei Bedarf Reinigungsutensilien durchgezogen werden. Das Leitungsgefälle von ca. 1 % stellt sicher, dass das Reinigungswasser nach aussen ablaufen kann.



Figur 6-17:  
Gesamtkeimzahl für Pilze in der Aussen-, Erdregister- und Zuluft von acht im Sommer untersuchten Luftansaug-Erdregister (CFU = Colony Forming Units, keimbildende Einheiten) [6.7]. Die Anzahl der Sporen ist im Sommer wesentlich höher als im Winter, aber das Verhältnis der Konzentration ist vergleichbar. Vom Lebensmittelladen in Schönenwert waren keine Konzentrationen in der Raumluft verfügbar.



Figur 6-18:  
Keimzahlen für Bakterien im Sommer [6.7]

Vor allem bei grösseren Anlagen ist darauf zu achten, dass Ansaugschächte nicht zur Lagerung von Gegenständen (insbesondere Brennholz) dienen, welche zu einer Kontamination der Luft führen können.

Die in Lüftungsanlagen üblichen Filter sind in der Regel ausreichend. Der Druckverlust resp. die Verschmutzung dieser Filter sollte überwacht und die Filter bei Bedarf ausgewechselt resp. gereinigt werden. Bei erhöhten lufthygienischen Anforderungen kann mittels Feinfiltern eine zusätzliche, namhafte Reduktion der Bakterien und Sporen erreicht werden.

*Literaturhinweise*

- [6.1] St. Remund, R. Rütti: Validierung von Luft-Erdregister-Modellen, ETH Zürich, Abt. IIIA, Juni 1996
- [6.2] A. Huber, St. Remund: Widerstands-Kapazitäten-Modell WKM\_LTe, Program for the Simulation of Air-Earth Heat Exchangers, IEA-BCS Annex 28 Low Energy Cooling, Subtask 2 Design Tools for Low Energy Technologies, 1999
- [6.3] M. Zimmermann: The "Schwerzenbacherhof" Office and Industrial Building - Case Study for Ground Coupled Ventilation System, IEA-CBS Annex 28 Low Energy Cooling, Subtask 3 Case Studies of Low Energy Cooling Technologies, EMPA, 1998
- [6.4] M. Zimmermann, St. Remund: Simplified Design Tool for Ground Coupled Air Systems, IEA-BCS Annex 28 Low Energy Cooling, Subtask 2 Early Design Guidance for Low Energy Cooling Technologies, 1999
- [6.5] P. Hollmuller, B. Lachal: Modèle pour tubes enterrés: Description et validation sur deux systèmes, 9. Schweiz. Status-Seminar, EMPA-KWH 1996, p. 91-96
- [6.6] P. Hollmuller, B. Lachal: TRNSYS combitable moist air hypocaust model, CUEPE, Université de Genève, 1998
- [6.7] B. Flückiger: Mikrobielle Untersuchungen von Luftansaug-Erdregistern, BEW/ATAL, 1997 (Bezug EMPA ZEN)
- [6.8] J. Pfafferot, A. Gerber, S. Herkel: Erdwärmetauscher zu Luftkonditionierung – Anwendungsbereiche, Simulation und Auslegung, Gesundheits-Ingenieur, August 1998
- [6.9] K. Sedlbauer, E. Lindauer, H. Werner: Erdreich/Luft-Wärmetauscher zur Wohnungslüftung, Bauphysik 16 (1994), Heft 2, S. 33-34, Berlin, 1994

## 7. Erdsonden und Energiepfähle

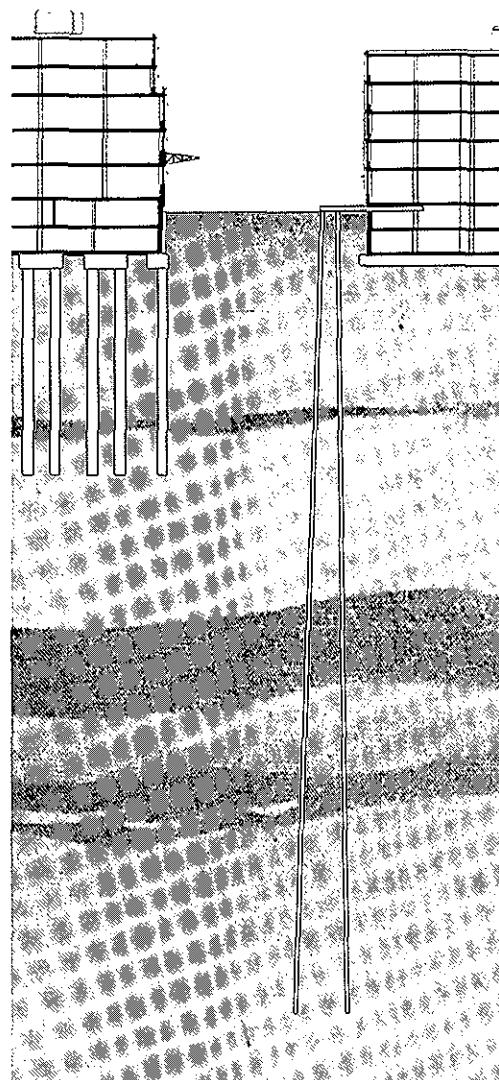
Die Nutzung des Erdreichs als saisonaler Speicher kann mittels Erdsonden oder Energiepfählen erfolgen. Bei beiden Systemen wird Wasser durch ein erdverlegtes Leitungssystem gepumpt, welches je nach Saison Wärme an das Erdreich abgibt oder Wärme aufnimmt. So wie beim Luftansaug-Erdregister kann auch hier die Nutzung des Erdreichs als Wärmequelle im Vordergrund stehen. Aber die sommerliche Nutzung des Erdreichs als Kältespeicher ist meist die massgebende Anwendung. Die bivalente Nutzung ermöglicht die thermische Regenerierung des Erdreichspeichers.

Erdsonden sind interessant, seit die Kosten für die notwendigen Bohrungen nicht mehr hoch sind. Sie liegen heute bei 6'000.- bis 6'500 Fr./100 m, mit sinkender Tendenz.

Im Sommer ist eine direkte Nutzung der Erdsonden zur Kühlung möglich. Im Gegensatz zum Luftansaug-Erdregister, wo praktisch nur die Frischluftkühlung in Frage kommt, können hier auch Kühldecken, Betonkernkühlung oder Geräte mit Abwärme angeschlossen werden. Idealerweise wird die zur Verfügung stehende Kälte je etwa hälftig für die Lüftung und die Bauteilkühlung verwendet.

Im Winter dienen die Erdsonden als Wärmequelle für monovalent betriebene Wärmepumpen, welche damit Jahresarbeitszahlen von bis zu 5 erreichen oder für die Frischluftvorwärmung.

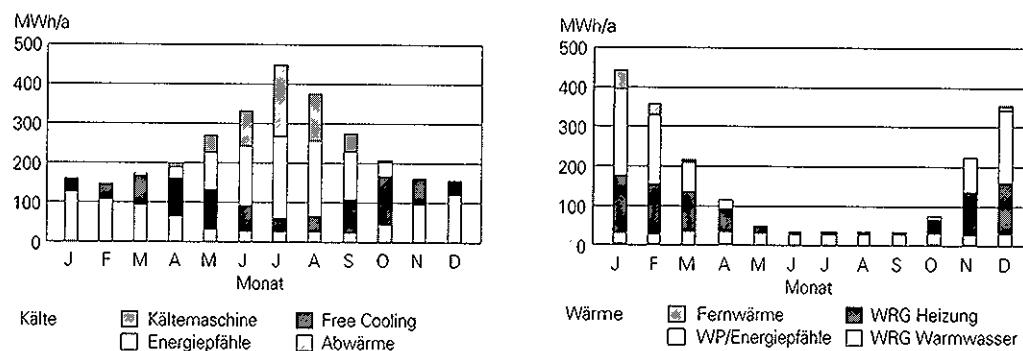
Energiepfähle sind wie Erdsonden, welche in die Fundationspfähle einbetoniert werden. Überall dort, wo Fundationspfähle erstellt werden müssen, bestehen nicht nur sehr günstige Möglichkeiten zum Verlegen der Sonden; meist weist auch der Baugrund gute thermische Eigenschaften auf (Grundwasser, gute Wärmeleitfähigkeit des Bodens).



Figur 7-1:  
Als Energiepfähle (links) werden Pfahlfundamente genutzt, die 20 bis 30 m in den Boden reichen. Ein Wärmebezug ist im Winter nur bis zur Frostgrenze möglich. Erdsonden (rechts) werden oft zum Heizen mittels Wärmepumpen, zur Luftvorwärmung und zum Kühlen eingesetzt. Die 70 bis 150 m tiefen Bohrungen sind auch für Sanierungen interessant.

Bild 7-2:

Wärme- und Kälteerzeugung für das Dock Midfield (Simulation). Im Sommer wird die Abwärme über 300, 25 m lange Energiepfähle an den Untergrund abgegeben. In der Übergangszeit wird die Abwärme mit Free-Cooling an die Außenluft abgeführt. Für Spitzenlasten sind zwei Kältemaschinen vorhanden.



### Temperaturverhältnisse im Erdreich

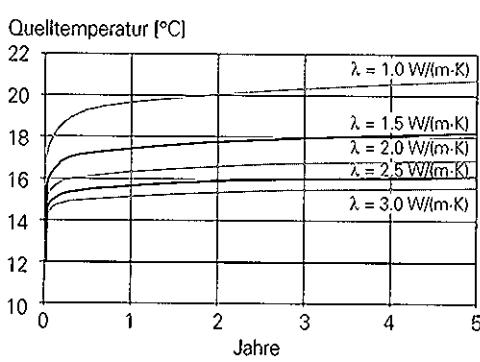
Bohrtiefe	freie Lage Mittelland	Zürich Basel	Davos (mit Schnee)
0 m	$\bar{t}_a = 9.5$	$\bar{t}_a = 9.5$	$\bar{t}_a = 3.2$
-25 m	11.3	12.5	8.0
-50 m	12.0	13.5	8.7
-75 m	12.8	14.5	9.5
-100 m	13.5	15.5	10.2
-125 m	14.3	16.5	11.0
-150 m	15.0	17.5	11.7
-175 m	15.8	18.5	12.5
-200 m	16.5	19.5	13.2

Tabelle 7-1:  
Erdreichtemperaturen in Abhängigkeit zur mittleren Jahresmitteltemperatur. In grossen Tiefen muss die Temperaturzunahme von etwa 3 K/100 m berücksichtigt werden. Zürich und Basel weisen eine leicht erhöhte Zunahme auf. Zudem liegt die Anfangstemperatur in Städten ca. 2 K höher als die Jahresmitteltemperatur, in schneereichen Gebieten (z.B. Davos) sogar 4 K.

Tabelle 7-2:  
Typische Wärmeleitfähigkeiten in Molasseböden

• Sand, trocken	1.2 W/(m·K)
• Kies, gesättigt	1.8 - 2.2 W/(m·K)
• Kalksandstein, Ton	2.2 - 2.8 W/(m·K)
• Silt	2.4 W/(m·K)
• Nagelfluh	2.8 W/(m·K)
• Granit	2.6 - 3.6 W/(m·K)

Figur 7-3:  
Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Bodens auf die Temperaturerwärmung bei nicht ausgeglichenem Jahresbilanz (Überschusswärme 10 W/m, Einzel-Sonde 80 m, ungestörtes Erdreich in 40 m Tiefe 11.9 °C, Sondendurchsatz 0.3 kg/s, Bohrdurchmesser 12 cm, Bohrlochwiderstand 0.1 m·K/W)



Sowohl Erdsonden wie Energiepfähle nutzen die Speicherfähigkeit des Boden in verhältnismässig grosser Tiefe. Bei Energiepfählen ist es die Fundationstiefe, die in der Regel zwischen 20 und 30 m liegt, bei Erdsonden wird normalerweise 70 - 150 m tief gebohrt. In beiden Fällen wird man in diesen Tiefen praktisch ungestörtes Erdreich antreffen.

Die Erdreichtemperatur liegt in diesen Tiefen einige Kelvin über der Jahresmitteltemperatur des Standortes. Die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen sind bis in Tiefen von 10 bis 15 m messbar, darunter herrschen konstante Temperaturen. In 10 Metern Tiefe ist das Erdreich etwa 1 K wärmer als die Lufttemperaturen im Jahreschnitt. In städtischen Gebieten liegt dieser Wert bei 2 K und in schneereichen Gegenden bis 4 K. Die Temperaturen nehmen mit 2.5 bis 4 K pro 100 m Tiefe zu (vgl. Tabelle 7-1). Steht die Kühlanwendung einer Erdsondenanlage im Vordergrund, so wählt man deshalb eher kürzere Sonden (50 bis 100 m), bei primärer Heizanwendung kommen längere Sonden (100 bis 200 m) zum Einsatz.

Wie im Kapitel über die Luftsaug-Erdregister beschrieben, haben die verschiedenen Böden verschiedene Wärmeleitfähigkeiten. Die Erdsonden befinden sich normalerweise (ausser in den obersten paar Metern) in der Molasse, wo die Gesteinsschichten gute Wärmeleitfähigkeiten aufweisen (Tabelle 7-2). In alten Moränenablagerungen und in reinen Kalkgegenden ist Vorsicht geboten (trockener Kies, Höhlen). Erdsonden sind da in der Regel nicht möglich. Im schweizerischen Mittelland (Molassebecken) liegen die Wärmeleitfähigkeiten oft zwischen 2.2 und 2.5 W/(m·K).

Bei den Erdsonden kommt der Widerstand der Hinterfüllung (Füllmaterial zwischen den Sonderohren und dem Bohrloch) hinzu. Diese Hin-

terfüllung ist in der Regel Bentonit, das eine bedeutend kleinere Wärmeleitfähigkeit als das Erdreich hat (ca. 0.8 W/(m·K)). Figur 7-3 zeigt die Quellentemperaturen bei Böden mit verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten. Es ist ersichtlich, dass bei schlechterer Wärmeleitfähigkeit die Quellen-temperatur spürbar ansteigt.

Spezielle Situationen können sich ergeben, wenn fliessendes Grundwasser vorkommt oder wenn grosse, darüberliegende Bauten das Erdreich künstlich erwärmen. Fliessendes Grundwasser wäre an sich günstig, da es die Leistungen des Systems erhöht. Wie zuverlässig die Fliessrichtung und wie gross die Fliessgeschwindigkeit ist, muss durch ein geologisches Gutachten sorgfältig geklärt werden. Vor allem die Fliessgeschwindigkeit ist schon verschiedentlich kleiner gewe-

sen als ursprünglich angenommen. Bei Fliessgeschwindigkeiten von mehr als 0.5 m pro Tag ist die tägliche und damit auch die saisonale Regeneration des Erdreichsgewährleistet. Niedrigere Geschwindigkeiten wirken sich allenfalls noch auf die jährliche Regeneration positiv aus.

Die Erwärmung des Erdreichs unter Gebäuden muss ebenfalls berücksichtigt werden, da diese die sommerliche Kühlleistung beeinträchtigt. Um langjährig eine konstante Leistung des Systems zu erhalten, muss vor allem bei Energiepfählen sorgfältig auf einen Ausgleich von Wärmebezug und Wärmespeicherung geachtet werden. Da die Kühlung meist kritischer ist und Kühlennergie auch teurer zu stehen kommt als Heizenergie, wird normalerweise darauf geachtet, dass dem Erdreich im Winter mehr Wärme entzogen wird als im Sommer gespeichert.

Die Planung einer Erdsonden resp. Energiepfahl-anlage muss primär folgende Faktoren berücksichtigen:

- Einbindung in das haustechnische Konzept,
- benötigte Kühlleistung resp. zur Verfügung stehende Pfahlänge,
- Rückkühlungsgrad des Erdreichs im Winter,
- thermische Eigenschaften des Erdreichs,
- Abstand der Pfähle.

### *Einbindung in haustechnisches System*

Grundsätzlich stehen hier Anlagen zur sommerlichen Kühlung im Vordergrund. Für die Leistungsfähigkeit des Systems ist es deshalb von Bedeutung, wie die Wärme aus dem Gebäude abgeführt wird und bei welchem Temperaturniveau.

Vorteilhafterweise wird nur teilweise über die Lüftung gekühlt. Der andere Teil erfolgt über Bauteilkühlung (Figur 7-4). Letztere weist eine grosse Trägheit auf und erfordert deshalb keine Spitzendeckung. Über die Bauteilkühlung kann kurzfristig sehr viel mehr Wärme abgeführt werden als über die Lüftung.

Sofern im Winter die Wärmenutzung ohne Wärmepumpe erfolgt, kann der gesamte Kreislauf mit Wasser betrieben werden. Dabei ist allerdings darauf zu achten, dass bei kalten Temperaturen keine Frostgefahr besteht. Es muss deshalb auf der Lüftungsseite ein Wasser/Glykol-Kreislauf eingefügt werden, welcher über ein Dreiwegventil das Gefrieren des Wärmetauschers verhindert.

Falls Energiepfähle eingesetzt werden, ist ohnehin darauf zu achten, dass die Fundation frostfrei bleibt.

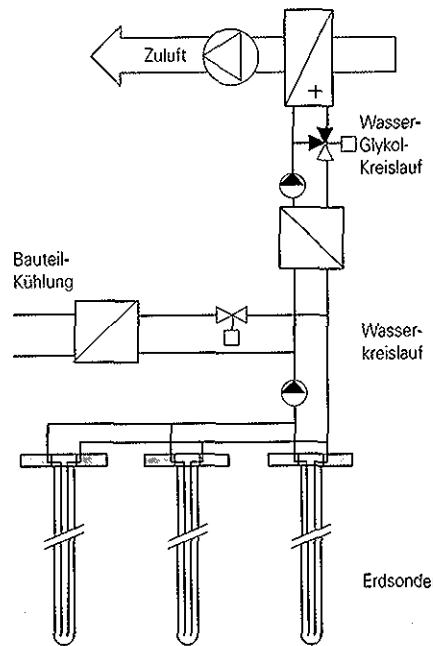
### *Planung und Dimensionierung*

#### *Wasser- oder Wasser/Glykol-Kreislauf*

Der Wasser-Kreislauf bietet gegenüber dem Wasser/Glykol-Kreislauf viele Vorteile:

- bessere Wärmeübertragung, turbulente Strömung schon bei kleinen Geschwindigkeiten,
- geringere Pumpenleistung bei gleichem Durchfluss,
- keine Risiken durch Leckagen im Erdreich,
- geringere Kosten.

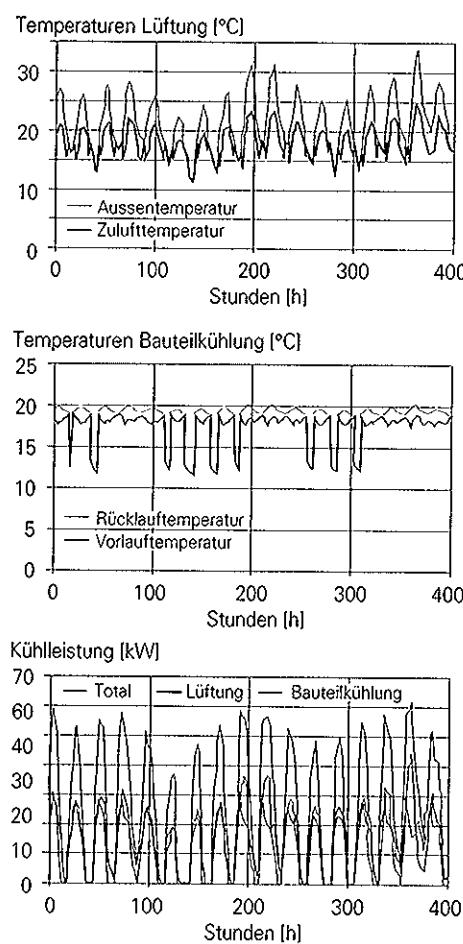
Ein Wasser/Glykol-Kreislauf ist deshalb nur dort zu empfehlen, wo die Anlage im Frostbereich betrieben werden muss, zum Bsp. bei Wärmeentzug mit Wärmepumpe.



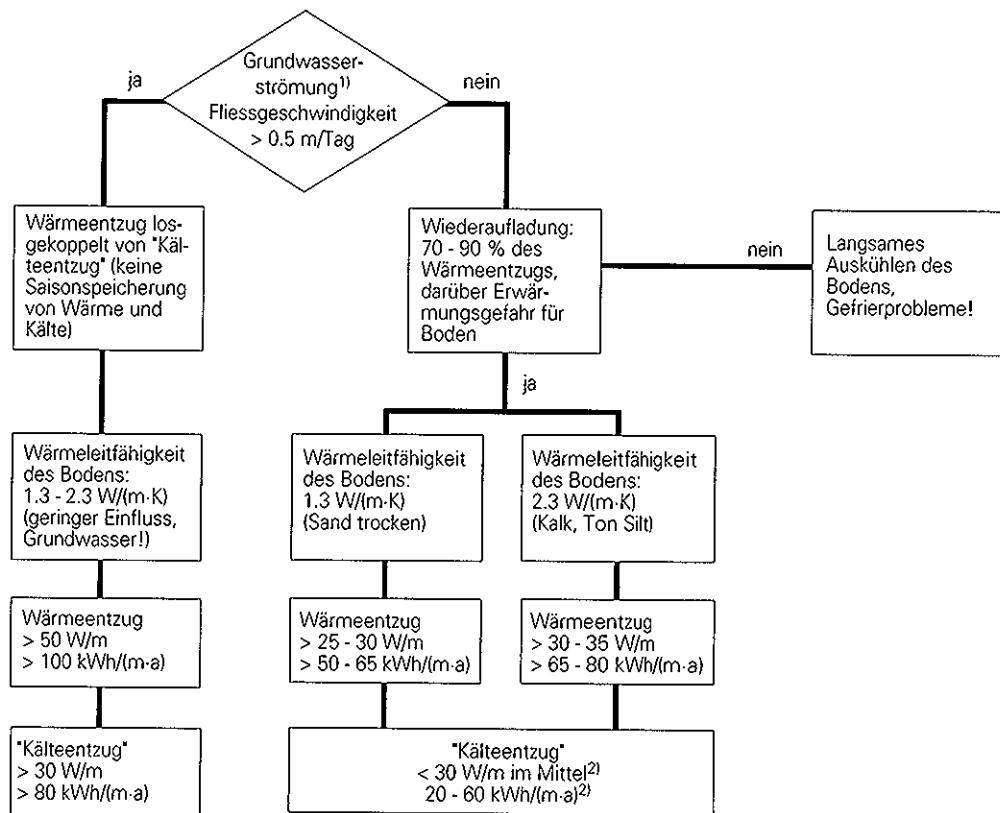
Figur 7-4:  
Einbindung der Erdsonden in die Haustechnik. Wegen Frostgefahr im Winter wird lüftungsseitig ein Wasser/Glykol-Kreislauf eingebaut und über ein Dreiwegventil geregelt.

## Kühlleistung

**Figur 7-5:**  
Simulierte Kühlleistung einer Erdsondenanlage (16 Sonden à 100 m Länge) für den Monat Juli  
oben: Kühlung Lüftung  
mitte: Kühlung Bauteile  
unten: Kühlleistung



**Figur 7-6:**  
Vereinfachte Dimensionierungsregeln für Energiepfähle und Erdsonden (Quelle [7.2])  
1) Eine dünne Grundwasserschicht genügt bereits für eine gute Wirkung  
2) Falls die sommerliche Wiederaufladung des Bodens 90 % der im Winter entzogenen Energie übersteigt, wird sich das Erdreich tendenziell erwärmen. Dadurch ist die Nutzung des Boden als Kältespeicher limitiert.



Wichtig ist nicht nur die Frage der Leistungsfähigkeit der Erdspeichers, sondern wie vorhin erwähnt auch das Kühlssystem im Gebäude.

Für die Leistungsfähigkeit der Erdsonden ist die Frage wichtig, ob mit fliessendem Grundwasser gerechnet werden kann. Falls ja, ist die selbständige Regeneration des Erdreichs täglich gewährleistet. Die verfügbare Kühl- und Heizleistung ist am grössten. Allerdings ist die Fliessgeschwindigkeit des Grundwassers meist sehr gering, im Bereich weniger Zentimeter pro Tag, was für die kurzfristige Regeneration ungenügend ist. Will man also die Wirkung des fliessenden Grundwassers ausnutzen, sollte eine sorgfältige Expertise eine Fliessgeschwindigkeit von mehr als 0.5 m/Tag nachweisen.

In den anderen Fällen mit stehendem Grundwasser oder trockenem Erdreich stellt der Boden ein Speicher dar, der geladen und entladen muss. Dies trifft vor allem für Energiepfaehlanlagen zu, da sich die einzelnen Pfähle gegenseitig beeinflussen. Weniger kritisch sind Erdsonden, bei denen immer etwas Wärme zu- oder abfliessen kann.

Grundsätzlich kann im Sommer etwa gleich viel Wärme gespeichert werden, wie im Winter wieder bezogen wird. Dieser Ausgleich sollte zumin-

dest über mehrere Jahre einigermassen gewährleistet sein. Um sicher zu gehen, dass sich das Erdreich nicht erwärmen kann, sollte dem Boden im Winter 10 bis 20 % mehr Wärme entzogen als im Sommer zugeführt werden.

### Erwärmung des Erdreichs, wenn die Kühlleistung die Wärmeleistung übertrifft

Wird dem Boden über die Jahre mehr Wärme zugeführt als entzogen, erwärmt sich dieser mit der Zeit. Figur 7-7 zeigt den Verlauf der Quellentemperatur, wenn bei einer Einzelsonde dem Boden ständig ein Überschuss an Kühlleistung zugeführt wird. Für die langfristige Erwärmung des Erdreichs über mehrere Jahre hinweg kommt es dabei nicht darauf an, ob diese Kühlleistung ganzjährig konstant, oder übers Jahr schwankend anfällt. Wichtig für die mehrjährige Erwärmung ist einzig die dem Boden zugeführte Kühlleistung im Jahresschnitt. Schon bei einer durchschnittlichen Einspeisung von 10 W/m ist die Erhöhung der Quellentemperatur bedeutend. Zusätzlich zu dieser langfristigen Erwärmung des Erdreichs sind die kurzzeitigen Entzugsspitzen zu berücksichtigen.

### Erwärmung des Erdreichs bei ausgeglichener Jahresbilanz

Bei einer ausgeglichenen Jahresbilanz der Erdsonde ist nur die saisonale Temperaturerhöhung zu berücksichtigen. In Figur 7-8 ist der saisonale Verlauf der Quellentemperatur einer Einzelsonde dargestellt. Die Kühlleistung ist als Durchschnittswert über die Kühlperiode zu verstehen.

### Kurzzeitige Kühllastspitzen

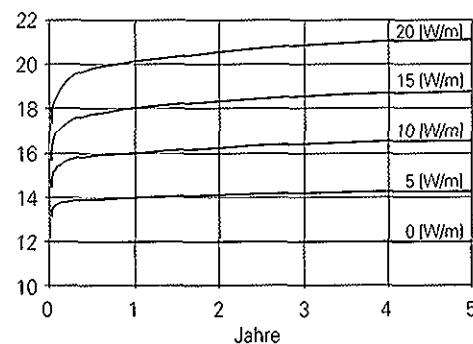
Zusätzlich zur saisonalen Temperaturerhöhung sind die kurzzeitigen Kühllastspitzen zu berücksichtigen. Diese sind in Figur 7-9 dargestellt und sind zum saisonalen Temperaturniveau zu addieren. Für die kurzzeitigen Spitzen ist es unerheblich, ob es sich um eine Einzelsonde oder um ein Sondenfeld handelt, da sich diese Schwankungen nur im Sondennahrbereich auswirken.

Bei einer saisonalen, durchschnittlichen Kühlleistung von 10 W/m ergibt sich gemäss Figur 7-8 nach 4 Monaten eine Quellentemperatur von ca. 16 °C. Nach einer 10-tägigen Hitzeperiode mit einem Kühlbedarf von 20 W/m im Tagesschnitt (d.h. zusätzlich 10 W/m Spitzenkühlleistung) wird eine Quellentemperatur von 19 °C (d.h. 3 K zusätzliche Temperaturerhöhung) erreicht. Das entscheidende Kriterium für die Dimensionierung der Sondenlänge ist nun, ob die anfallende Kühllast mit diesem Temperaturniveau auch abgeführt werden kann. Ist dies nicht der Fall, muss die totale Sondenlänge vergrössert und so die relative Sondenbelastung reduziert werden.

### Typische Planungskennwerte

- Durchschn. Kühlleistung: 20 -30 W/m Sonde
- Wärme-/Kältespeicherung: 60-80 kWh/(m·a)
- Max. Entnahmetemperatur Sommer: 20 °C
- Min. Entnahmetemperatur Winter: 2 °C
- 100 bis 150 m Sonden für Lüftungsleistung von 1'000 m<sup>3</sup>/h

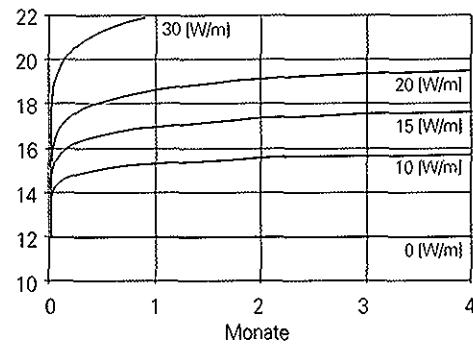
Quelltemperatur [°C]



Figur 7-7:

Erhöhung der Quelltemperatur bei nicht ausgeglichener Jahresbilanz (durchschnittlicher Mehreintrag von 0 - 20 W/m) (Einzel-Sonde 80 m, lerde 2.2 W/(mK), ungestörtes Erdreich in 40 m Tiefe 11.9 °C, Sondendurchsatz 0.3 kg/s, Bohrdurchmesser 12 cm Bohrlochwiderstand 0.1 Km/W)

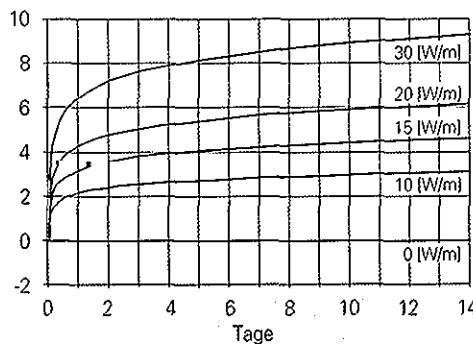
Quelltemperatur [°C]



Figur 7-8:

Saisonale Erhöhung der Quelltemperatur bei ausgeglichenener Jahresbilanz (durchschnittlicher Eintrag von 0 - 30 W/m). Systemauslegung gemäss Figur 7-7

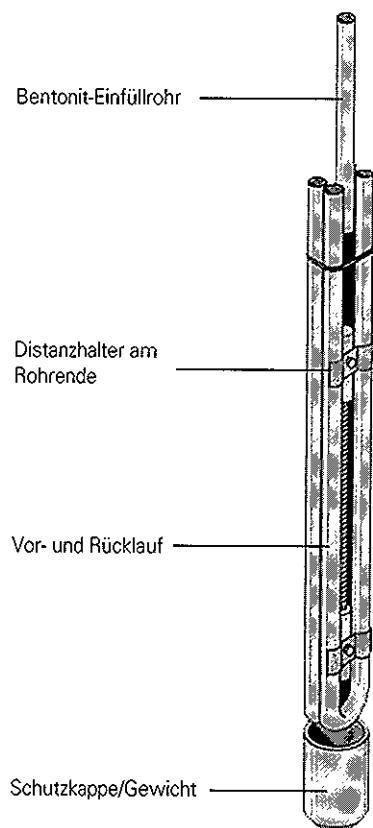
Temperaturerhöhung [K]



Figur 7-9:

Temperaturerhöhung bei kurzzeitiger, zusätzlicher Spitzenkühlung von 0 - 30 W/m. Systemauslegung gemäss Figur 7-7

## Konstruktive Hinweise



*Figur 7-10:  
Energiesonde aus MDPE, wie sie üblicherweise eingesetzt wird (Grundag-Duplex-Sonde),  
Rohrdurchmesser 32 mm,  
Wandstärke 3 mm*

## Energiesonden

Bei den Energiesonden handelt es sich praktisch durchwegs um Kunststoffrohre aus HDPE, die in verschiedenen Anordnungen eingesetzt werden können. Durchgesetzt hat sich vor allem die Anordnung mit zwei Doppelrohren gemäss Figur 7-10. Möglich sind auch drei Doppelrohre, welche das Bohrloch etwas besser ausfüllen, dafür in gegenseitigem Kontakt sind, was die Leistung wiederum etwas reduziert. In der Mitte ist ein zusätzliches Rohr angeordnet, durch welches das Bohrloch mit einem Bentonit/Zement/Wasser-Gemisch ausgefüllt werden kann und welches sicherstellt, dass die wasserführenden Rohre nicht von der Bohrwand wegrutschen.

Die üblicherweise verwendeten Rohrdurchmesser (außen) betragen 32 mm. Erhältlich sind auch 25 mm, die jedoch selten eingesetzt werden, da keine entsprechend kleinere Bohrungen ausgeführt werden, sowie 40 mm für Erdsonden über 100 m Länge.

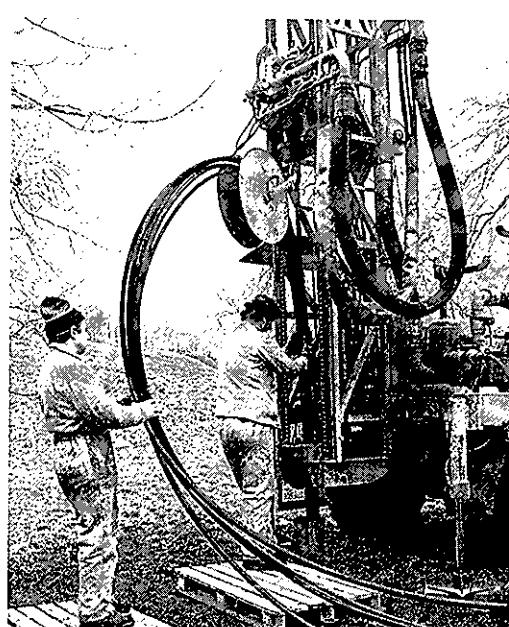
Die entsprechenden Bohrdurchmesser betragen 120 mm für die dünneren Rohre resp. 135 mm für Erdsonden mit 40 mm Rohren. Die Bohrzeit beträgt ca. ein Tag für 120 m Sonden und Bohrmaschine. Dabei werden etwa 30 m<sup>3</sup> Spülwasser benötigt und es fallen etwa 3 m<sup>3</sup> Bohrschlamm an, der abgeführt werden muss.

## Energiepfähle

Die Situation bei Energiepfählen ist grundlegend anders, da die Sonden nicht in ein vorbereitetes Bohrloch versenkt werden können.

Bei örtlich erstellten Fundationspfählen werden die Rohre an die Armierungskörbe befestigt und mit diesen in das Bohrloch versenkt. Solange die Armierungskörbe in einem Stück versenkt werden, lassen sich die Sonden problemlos vormontieren. Schwieriger wird es, wenn die Armierung bei langen Pfählen in mehreren Teilen versenkt wird. Hier müssen die mit dem ersten Korb versenkten Sonden in die nachfolgenden Armierungskörbe eingeführt werden. Auf jeden Fall müssen die Sonden in einem Stück vorgefertigt sein. Auf der Baustellen sollen keine Schweißarbeiten vorgenommen werden.

Möglich ist auch die Anwendung bei vorgefertigten Rammpfählen. Hier werden natürlich die Sonden schon werkseitig bei der Herstellung verlegt. Das Problem liegt beim Einrammen. Es müssen Vorkehrungen getroffen werden, dass die Leitungsanschlüsse nicht beschädigt werden.



Figur 7-12:  
 Einfluss der Sondenanordnung auf die Quelltemperatur, bei einer Kühlleistung im Jahresdurchschnitt von 5 W/m  
 1 0 W/m  
 2 Einzelsonde  
 3 4 Sonden im Quadrat  
 4 16 Sonden in Linie  
 5 16 Sonden im Quadrat  
 6 64 Sonden im Quadrat  
 (Sonden 80 m lang,  
 $\lambda_{\text{Erde}}$  2.2 W/(m·K),  
 ungestörtes Erdreich in 40 m  
 Tiefe 11.9 °C,  
 Sondenabstand 8 m,  
 Sondendurchsatz 0.3 kg/s,  
 Bohrdurchmesser 12 cm  
 Bohrlochwiderstand 0.1 m·K/W)

Bei der Anordnung der Sonden in der Pfählung ist man grundsätzlich frei. Mit zunehmender Sondenanzahl nimmt die Spitzenleistung entsprechend zu, während die durchschnittliche Leistung nur beschränkt vergrößert wird.

### Anbindung an das System

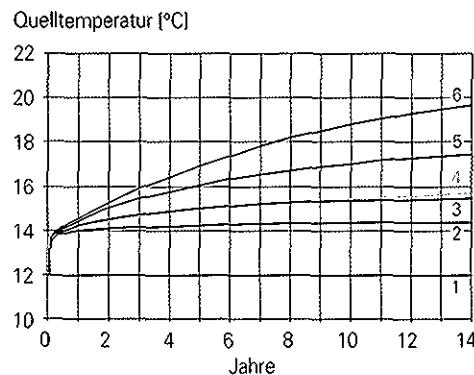
Die Anschlüsse der Sonden werden in genügender Tiefe (ausserhalb Frostbereich) zu einem Sondenverteiler im Gebäude geführt. Jeder Kreislauf sollte für sich mit einem Absperrventil ausgerüstet sein. Der Platzbedarf des Verteilers liegt bei 40 cm + 15 cm/Sonde.

Vom Sondenverteiler gehen die Anschlüsse zu den Wärmetauschern (vgl. Figur 7-4) für Lüftung und sofern vorhanden für Bauteilkühlung oder Wärmepumpe. Lüftungsseitig wird ein Wasser/Glykol-Kreislauf mit Dreiwegventil vorgeschaltet, um Frostprobleme zu vermeiden. Dies ist notwendig, da das Register direkt nach dem Außenluft-Ansaug angeordnet wird. Die Wärmerückgewinnung aus der Abluft erfolgt erst danach.

Die Plattenwärmetauscher sind grosszügig zu bemessen um einen guten Wirkungsgrad zu erzielen. Die Wärmetauscher sind kein Kostenfaktor.

Bei einem Sondenfeld findet eine gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Sonden statt. Je weiter die Sonden auseinander liegen, um so länger geht es, bis diese Beeinflussung in der Quelltemperatur sichtbar wird. Als Faustregel sollte deshalb der Abstand der Sonden etwa 10 % der Sondentiefe sein. Ist dies der Fall, so ist bei ausgeglichener Jahresbilanz nur ein geringer Unterschied zum Verhalten einer Einzelsonden sichtbar. Aus praktischen Gründen müssen beim Sondenabstand allerdings oft Kompromisse eingegangen werden.

Ist die Jahresbilanz jedoch nicht ausgeglichen, so ist auch bei grossen Sondenabständen über die Jahre ein beachtlicher Temperaturanstieg festzustellen.



### Ausführungshinweise

- Schweißungen auf der Baustelle (zwischen Sonde und Verteiler) auch mechanisch befestigen.
- Jede Sonde einzeln absperrbare
- Injektionsrohr ganz nach unten führen und Bentonitgemisch (100 kg Bentonit, 200 kg Zement, 880 l Wasser) von unten auffüllen
- Sonden mit Wasser abdrücken
- Bei Sondenbohrungen Arteseversicherung zum Abdichten gespannten Wassers abschliessen

### Erkenntnisse für die Praxis

Energiesonden und Energiepfähle stellen ein relativ kostengünstiges System dar, um Wärme und Kälte aus dem Boden zu gewinnen. Wo kein fliessendes Grundwasser erwartet werden kann, ist eine sorgfältige Planung und die Ermöglichung einer ausgeglichenen Bilanz zwischen Wärmeentzug und Wärmeeintritt wichtig. Dies zeigen nicht nur die Simulationsergebnisse, sondern auch die Erfahrungen bei realisierten Anlagen.

Neben den energetischen Problemen stellen sich vor allem bei Energiepfählen auch bautechnische Probleme. Der Bau von Energiepfählen, insbesondere in der Technik aus Ortsbeton, ist noch weitgehend Neuland. Die meisten Unternehmer, aber auch Bauingenieure, kennen dieses System noch nicht. Die Details der Verlegung der Rohre, der Schutz vor Beschädigungen und der Zusammenführung bis zur Zentrale müssen genau überlegt werden. Die Fragen der Verantwortung, der Haftung bei Defekten und der Aufgabenzuordnung sind klar zu regeln. Eine enge Zusammenarbeit zwischen Bauingenieuren und Haustechnikern ist unumgänglich.

### Dimensionierung des Sondendurchflusses

$$\dot{m} = \frac{\dot{q} \cdot H}{cp \cdot \Delta T}$$

Massenstrom für Solekreislauf

$\dot{m}$  Massenstrom [kg/s]

$\dot{q}$  spez. Kühlleistung pro m Sondenlänge [W/m]

$H$  Sondenlänge [m]

$cp$  Wärmekapazität der Sole [kJ/kg·K]

$\Delta T$  Temperaturdifferenz am Wärmetauscher [K]

Die Leistung der Sonde ist proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Quelltemperatur und Rücklauftemperatur, zur spezifischen Wärmekapazität der Sole und der geförderten Menge. Da die Rücklauftemperatur im Sondenkreislauf nicht höher sein kann als die Temperatur des zu kühlenden Mediums (Zuluft oder Kältekreislauf im Gebäude), ist durch diese Bedingung in der Regel ein minimaler Sondendurchfluss vorgegeben. Eine darüber hinausgehende Erhöhung des Sondendurchflusses senkt zwar die Rücklauftemperatur im Sondenkreislauf, erhöht aber gleichzeitig auch die Quelltemperatur, da die Verweilzeit der Sondenflüssigkeit im Boden sinkt. Es ist somit nur in sehr geringem Umfang möglich, durch eine Erhöhung des Sondendurchflusses die Kühlleistung zu erhöhen. Dies wird aber mit einer wesentlich grösseren Pumpenleistung erkauft. Bei zu geringer Leistung der Erdsonde führt somit kein Weg an mehr Sondenmetern oder grösseren Sondendurchmessern vorbei.

### Literaturhinweise

- [7.1] 3. Symposium: Erdgekoppelte Wärmepumpen - Systeme zum Heizen und Kühlen, Fachinformation Karlsruhe, IZW-Bericht 2/97, docdel@fiz-karlsruhe.de
- [7.2] Schweizer Ingenieur und Architekt, Sonderheft Nr. 27/28, 1998, Dock Midfield, Zürich Flughafen", Redaktion SI+A, Zürich
- [7.3] D. Pahud, A. Fromentin: Pieux échangeurs: outils de simulation, KWH - Energieforschung im Hochbau, Status-Seminar ETH Zürich, 1998
- [7.4] Th. Afjei et al.: Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe. Phase 2: Ökologischer und ökonomischer Vergleich, Systemoptimierung, intelligente Regelung, Versuche. Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm UAW, Bern, 1998
- [7.5] P. Eskilson: Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1987
- [7.6] W. Hässig, D. Suter, R. Bigler, A. Huber: Regeneration von Erdwärmesonden, Phase I: Potentialabschätzung. Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm UAW, Bern. ENET-Nr. 9722601 / 1; Artikelnummer 30897, 1998
- [7.7] G. Hellström: Ground Heat Storage, Thermal Analyses of Duct Storage Systems, Theory, Dep. of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden, 1991
- [7.8] A. Huber, Ch. Müller, O. Berchtold, H. Eggenberger: Luftvorwärmung für Wärmepumpen in Erdregistern. Phase 1, Kosten-Nutzen-Analyse. Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm UAW, Bern. ENET-Nr. 9554499 / 1, 1996
- [7.9] A. Huber, O. Schuler: Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm UAW, Bern, ENET-Nr. 9658807, 1997
- [7.10] M. Wetter, A. Huber: TRNSYS Type: Vertical Borehole Heat Exchanger, EWS Model, Zentralschweizerisches Technikum ZTL, Luzern, 1997
- [7.11] Erdwärmesonden: Submission und erste Projektannahmen, interne Checkliste, Meierhans & Partner, Fällanden, 1999

# 8. Bauteilkühlung

Die Bauteilkühlung nutzt die Gebäudespeichermasse für die Raumkühlung. Dadurch müssen die im Raum anfallenden Wärmelasten von Personen, Geräten und Besonnung nicht sofort abgeführt werden, sondern können in der Bauteilmasse zwischengespeichert werden.

Für die Bauteilspeicherung speziell geeignet sind massive Betondecken. Sie können tagsüber Wärme aufnehmen und diese zeitverzögert über ein eingelegtes Leitungssystem wieder abgeben. Durch ihre grosse Oberfläche und Trägheit reagieren Betondecken ausgleichend auf Temperaturschwankungen im Raum.

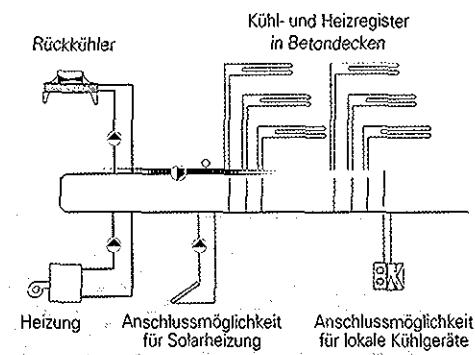
Thermoaktive Betondecken werden verschiedentlich nicht nur zur Kühlung im Sommer, sondern auch zur Beheizung im Winter eingesetzt. Da die Temperaturregelung der grossen Bauteilmasse schwierig ist, wird auch hier der Selbstregeleffekt bei tiefen Vorlauftemperaturen ausgenutzt. Eine Voraussetzung dazu ist allerdings, dass die thermischen Verluste durch eine gut gedämmte Gebäudehülle klein gehalten werden.

## Thermoaktive Bauteilsysteme

Moderne, hochwärmegedämmte Gebäude schaffen neue Voraussetzungen für Beheizung und Kühlung. Im Verhältnis zur vorhandenen Speichermasse sind die Wärmeflüsse sehr klein, weshalb es auf der Hand liegt, Niedertemperatursysteme einzusetzen, welche sehr nahe an der Raumtemperatur operieren und deshalb Selbstregeleffekte nutzen können. Dadurch vereinfachen sich nicht nur die Installationen, Niedertemperaturwärme und natürliche Kältesenken lassen sich besser nutzen.

Eines der ersten Objekte mit Betondecken-Kühlung war das *DOW-Gebäude* in Horgen [8.4], [8.6]. Die weitere Entwicklung dieses Konzeptes führte zur kombinierten Betondecken-Kühlung und -Heizung, welche unter dem Begriff *BATISO* (*Bâtiment isotherme*) von der Firma Geilinger realisiert wurde [8.7]. Weitere Projekte folgten und bewiesen nicht nur die Funktionsfähigkeit des Konzepts, sondern auch dessen Wirtschaftlichkeit und den hervorragenden Raumkomfort.

Die nachfolgend zusammengestellten Planungsgrundlagen basieren auf diesen Erfahrungen sowie auf dem Projekt *Planungsgrundlagen für thermoaktive Bauteilsysteme*, welches mit Unterstützung des Bundesamtes für Energie durch M. Koschenz und B. Lehmann an der EMPA durchgeführt wurde [8.1].



Figur 8-1:  
Prinzipschema der thermoaktiven Deckensysteme

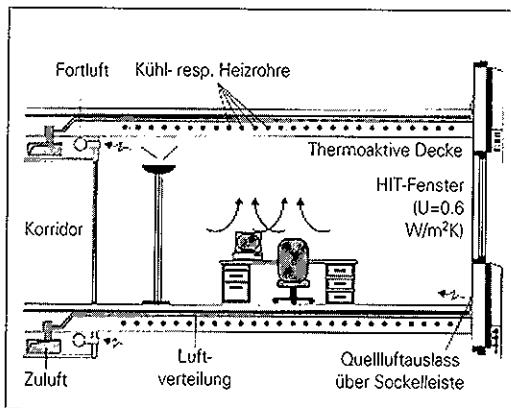
## Systeme und Funktionsweisen

### Gesamtsystem

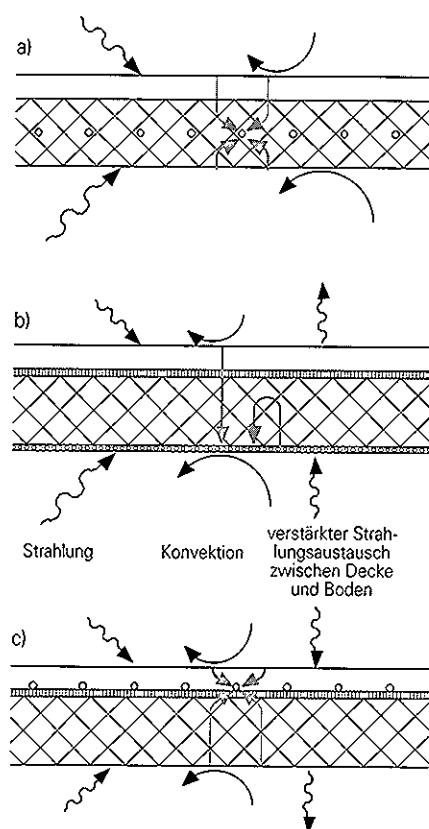
Das Konzept der Bauteilkühlung basiert auf 5 wesentlichen Elementen:

- einer hochwärmegedämmten Gebäudehülle, welche die externen thermischen Lasten niedrig hält und auch einen guten Sonnenschutz gewährleistet,
- moderaten internen Wärmelasten bis 150 Wh/(m<sup>2</sup>·d),
- einer kontrollierten Lüftung mit WRG, welche die Luftqualität sicherstellt,
- einer unverkleideten Betondecke mit eingelagten Kühl- resp. Heizrohren,
- einer Rückkühlungsmöglichkeit, sei es ein Wärmetauscher über Dach, die Nutzung von Grundwasser oder der Einsatz einer kleinen Kältemaschine.

Figur 8-2:  
Schematische Darstellung  
der thermoaktiven Bauteilkühlung am Beispiel des  
BATISO-Konzeptes (vgl.  
Kasten Seite 65)



Figur 8-3:  
Prinzipielle Anordnungsmöglichkeiten für die  
Bauteilkühlung  
a) Betonkernkühlung  
b) Kapillar-Kühlung an Deckenuntersicht  
c) Fußbodenkühlung



Die Bauteilkühlung ist vor allem für Neubauten prädestiniert, da hier die Betondecken optimal ausgelegt werden können. Rund zwei Drittel der Energie lässt sich über die Deckenunterseite austauschen, der Rest trägt der darüberliegende Boden bei. Diese Aufteilung garantiert einen guten Komfort, sowohl beim Kühlbetrieb im Sommer als auch beim Heizen im Winter.

Denkbar sind jedoch auch Lösungen bei Gebäudesanierungen, wobei die Kühlleitungen entweder analog einer Bodenheizung oder direkt auf die Deckenuntersicht verlegt werden (vgl. Figur 8-3). Die Leistungsunterschiede sind nicht so verschieden, da der Strahlungsaustausch zwischen Boden und Decke einsetzt, sobald die Oberflächentemperaturen unterschiedlich sind.

## Thermoaktives Bauteil

Die Energieübertragung von den Wärmequellen ins Bauteil erfolgt durch zwei verschiedene Transportmechanismen:

- Strahlung,
- Konvektion.

Der Strahlungsaustausch findet direkt zwischen der Wärmequelle und der Bauteilloberfläche statt. Im Gegensatz dazu erfolgt die konvektive Wärmeübertragung von der Wärmequelle zuerst an die Raumluft und in einem zweiten Schritt von dort über Konvektion ebenfalls ans Bauteil. Die konvektiven Anteile der Lasten beeinflussen also direkt die Raumlufttemperatur.

### Speicherung

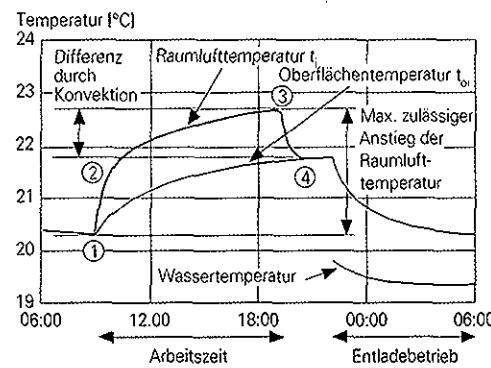
Aufgrund der hohen thermischen Speicherkapazität der Bauteilmasse erwärmt sich diese auch bei hohen Lasten eher gering (von Punkt 1 nach 4 in Figur 8-4). Eine Wärmelast von  $220 \text{ Wh/m}^2$  erwärmt beispielsweise innert 8 Stunden eine 30 cm dicke Betondecke nur um 1 K. Die Erwärmung der Decke ist deshalb nicht entscheidend. Selbst wenn über Nacht die gespeicherte Wärme einmal nicht vollständig abgeführt werden kann, ist davon anderntags kaum etwas merkbar.

### Konvektiver Wärmeübergang

Umgekehrt führen – infolge der geringen Speicherkapazität der Luft und des kleinen konvektiven Wärmeübergangs an horizontalen Bauteilen von  $1.5 \text{ bis } 2.5 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$  – schon geringe Wärmeströme zu einem sofortigen Anstieg der Temperaturdifferenz zwischen Raumluft- und Bauteilloberflächentemperatur (von Punkt 1 nach 2). Eine interne konvektive Last von  $20 \text{ W/m}^2$  erwärmt die Raumluft bereits innert 10 Minuten um ca. 4 K.

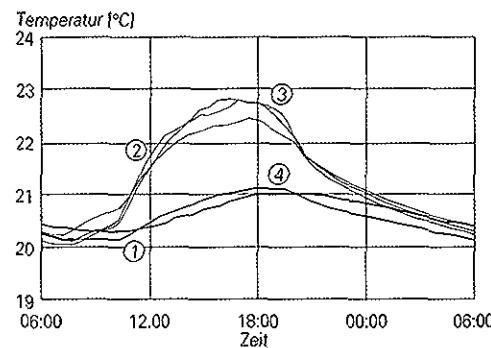
Ein grosser Teil der komfortmäßig möglichen Temperaturerhöhung zwischen Morgen und Abend (von Punkt 1 nach 3) wird deshalb durch den konvektiven Temperatursprung "aufgebraucht". Damit ist die maximal zulässige Erwärmung des Bauteils und dessen nutzbare Speicherwirkung eingeschränkt.

Vor allem die Grösse der Oberfläche und weniger die Anordnung der Speichermasse sind wichtig. Auch die nächtliche Auskühlung der Betondecke ist nicht unbedingt für die Leistungsfähigkeit des Systems. Abgesehen davon, dass der Raum morgens nicht unterkühlt sein soll (mind.  $20^\circ\text{C}$ ), wird jede Erhöhung der Temperaturdifferenz zwischen Raum und Decke etwa zu zwei Dritteln durch den konvektiven Temperatursprung "beansprucht".



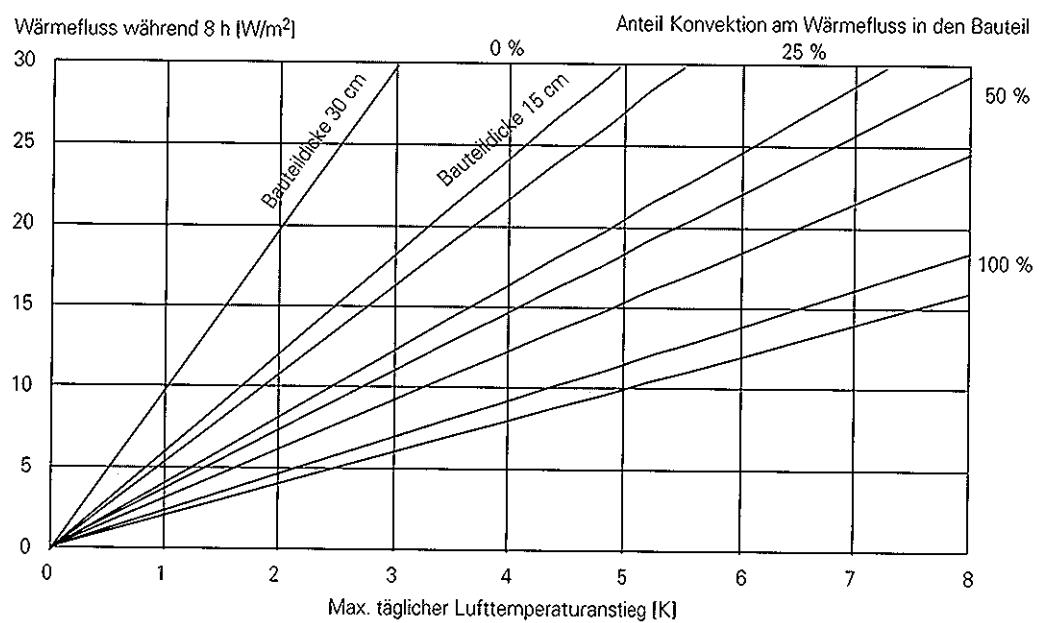
Figur 8-4:  
Typischer Verlauf der Raumluft-, der Bauteilloberflächen- und der Wassertemperatur während einer Tagesperiode (qualitativ)

- 1 Ausgangstemperatur Raumluft und Decke
- 2 konvektiver Temperatursprung
- 3 max. Raumtemperatur
- 4 max. Deckentemperatur



Figur 8-5:  
Gemessene Temperaturen der Messe Zürich während der Ferien- und Sportmesse FESPO (Punkte 1 bis 4 vgl. Text resp. Figur 8-4)

**Figur 8-6:**  
Auslegungsdiagramm für zulässigen Wärmefluss für jede Bauteilseite von Betonkonstruktionen der Dicke 15 - 30 cm, ohne Bodenbelag. Wärmequellen während 8 h in Betrieb, Kühlung nur ausserhalb der Betriebszeit



**Tabelle 8-1:**  
Richtwerte für Strahlungs- und Konvektionsanteile von Wärmequellen

	Strahlungs-Anteil	Konvektions-Anteil
Bürogeräte		
• mit Ventilator	10 %	90 %
• ohne Ventilator	20 %	80 %
Beleuchtung	50 %	50 %
Personen	70 %	30 %
Solarstrahlung	90 %	10 %

#### Wärmeübertragung durch Strahlung

Anders verhält es sich mit der Strahlung. Der Wärmeaustausch über Strahlung erfolgt ohne Temperatursprung und deshalb wesentlich rascher und effizienter als derjenige über Konvektion. Ein Temperaturunterschied zwischen zwei Flächen von 1 K verursacht einen Wärmestrom von etwa 5 Watt/ $\text{m}^2$ . Wärmelasten mit hohem Strahlungsanteil können deshalb besser abgeführt werden. Tabelle 8-1 zeigt einige Richtwerte für Strahlungs- und Konvektionsanteile.

#### Laden und Entladen

Entscheidend für das Laden des Bauteilspeichers ist die maximale Wärmelast (Lastspitze) in  $\text{W/m}^2$ .

Für das Entladen des Bauteilspeichers ist die täglich abzuführende Wärmemenge in  $\text{Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  wichtig.

Eine unverkleidete Betondecke bietet die beste Voraussetzung für diesen Wärmeaustausch. Auch bei konstruktiv nicht optimalen Bauteilen findet ein gewisser Strahlungsaustausch zwischen Boden und Decke statt (Figur 8-3).

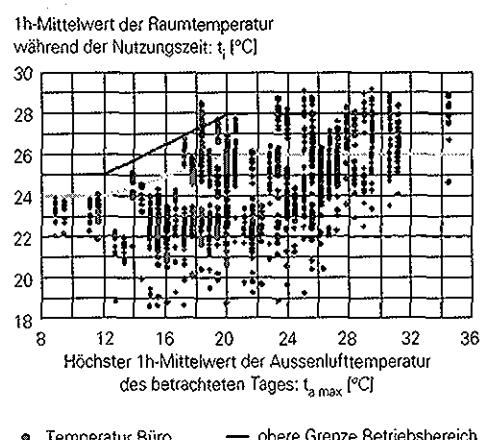
Die Figur 8-6 dient als grobes Auslegungsdiagramm für thermoaktive Betondecken. In diesem Diagramm wird die maximale, tägliche Temperaturerhöhung der Raumluft (von Punkt 1 nach 3 gemäß Figur 8-4) dem dadurch möglichen Wärmefluss pro Bauteilseite während 8 h gegenübergestellt.

Jede schraffierte Fläche ist einem bestimmten konvektiven Anteil des Wärmeflusses in das Bauteil zugeordnet. Dabei bedeutet 25 % Konvektion, dass 25 % der Wärmelast in Form von Konvektion und 75 % in Form von Strahlung auf das Bauteil einwirken. Dies tritt z.B. bei starker Sonneneinstrahlung auf.

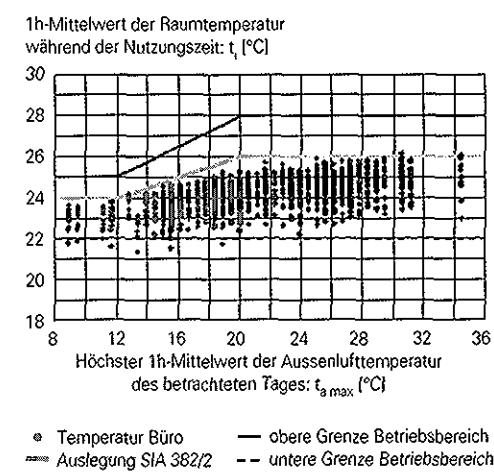
Die linke Begrenzungslinie der schraffierten Flächen gilt für eine gesamte Bauteildicke von 30 cm, die rechte Begrenzungslinie für 15 cm.

Geht man davon aus, dass am Boden und an der Decke der gleiche Wärmestrom fließt, so können bei einer 30 cm dicken Betonplatte, 5 K Temperaturanstieg und 50 % konvektiver Wärmelast etwa 36 W/m<sup>2</sup> aufgenommen werden (2 Seiten à 18 W/m<sup>2</sup>). Über 8 Stunden sind dies immerhin 290 Wh/m<sup>2</sup>. Dies bedingt jedoch, dass die Wärme nachts auch wieder abgeführt werden kann.

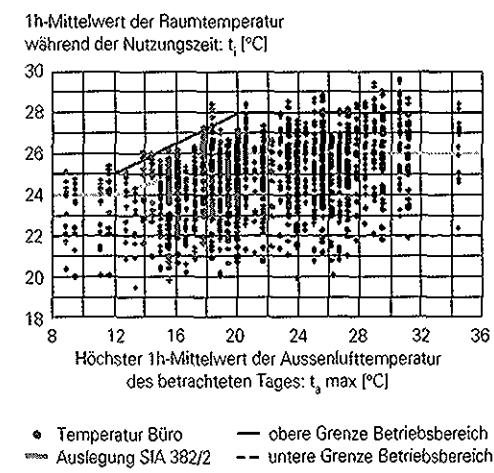
Die Figuren 8-7 bis 8-9 zeigen die Wirkung der Bauteilkühlung auf einen typischen Büraum. Während eine Nachtlüftung mit Kippfenster bereits bei geringen Wärmelasten von 20 W/m<sup>2</sup> resp. 160 Wh/(m<sup>2</sup>·d) zu teilweise unkomfortablen Zuständen führt, ist die selbe Situation mit Bauteilkühlung völlig unproblematisch. Selbst Büroräume mit hohen Wärmelasten (46 W/m<sup>2</sup> resp. 370 Wh/(m<sup>2</sup>·d)) sind mit der Bauteilkühlung noch machbar.



**Figur 8-7:**  
Passive Kühlung des Bürogebäudes mit Nachtlüftung (Kippfenster).  
Überschreitung des Betriebsbereiches: 27 Kelvin-h  
(bei 20 W/m<sup>2</sup>)



**Figur 8-8:**  
Kühlung des Bürogebäudes mit Bauteilkonditionierung.  
Überschreitung des Betriebsbereiches: 0 Kelvin-h  
(bei 20 W/m<sup>2</sup>)



**Figur 8-9:**  
Kühlung des Bürogebäudes mit Bauteilkühlung.  
Maximale Lasten.  
Überschreitung des Betriebsbereiches: 19 Kelvin-h  
(bei 46 W/m<sup>2</sup>)

## Rückkühlung

Ein Vergleich zwischen der anfallenden Wärmeenergie und der aus den Bauteilen abgeführten Energie zeigt, dass ein Teil der Energie durch Gebäudeverluste den Raum verlässt. Für normale Büronutzungen belaufen sich diese Verluste auf ca. 40 %, für Büros mit hohen internen Lasten auf ca. 20 %. Die Gebäudeverluste haben somit einen bedeutenden Einfluss auf die Dimensionierung des Rückkühlwerks.

Zur Rückkühlung der Betondecken werden sinnvollerweise natürliche Kältesenken genutzt. Aber auch kleine Kältemaschinen kommen oft unterstützend zum Einsatz. Sie sind vertretbar, wenn der gesamte Hilfsenergieverbrauch zur Raumkonditionierung (Lüftung, Pumpen, Kältemaschine) beim Neubau 5 W/m<sup>2</sup> resp. bei Gebäudesanierungen 10 W/m<sup>2</sup> nicht übersteigt.

Am vorteilhaftesten ist die Nutzung von Grundwasser. Die Rückkühlung erfolgt bei relativ niedrigem Temperaturniveau und ist zeitlich ungebunden. Die Leistungsfähigkeit hängt primär von der Menge des zur Verfügung stehenden Grundwassers ab. Die Nutzungsmöglichkeit von Grundwasser dürfte jedoch selten gegeben sein.

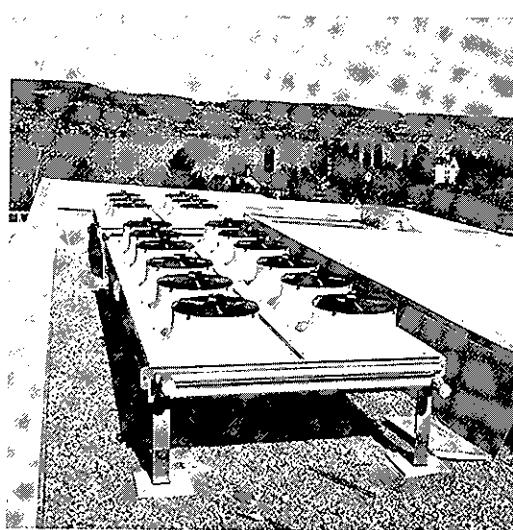
Eine Alternative stellen Erdsonden und Energiepfähle dar, die ebenfalls das Erdreich als Temperatursenke nutzen. Bei entsprechender Auslegung können sie nicht nur im Sommer zur Kühlung, sondern auch im Winter als Wärmequelle genutzt werden (vgl. Kap. 7).

Die wohl am weitesten verbreitete Rückkühlung erfolgt während der Nacht über die kühle Außenluft. Grundsätzlich können dazu Trocken- oder Nasskültürme eingesetzt werden. Die Leistungsmerkmale der beiden Verfahren unterscheiden sich nicht grundsätzlich, da während der kühlen Nächte die relative Luftfeuchtigkeit stark ansteigt (vgl. Kap. 5 Verdunstungskühlung). Nasskübler gelangen deshalb praktisch nur zum Einsatz, wenn auch tagsüber eine Kühlleistung erbracht werden muss. Im Normalfall werden Trockenkübler (Figur 8-10) eingesetzt, die wesentlich günstiger in Anschaffung und Betrieb sind.

Figuren 8-11 und 8-12 zeigen die zu erwartende Rückkühlleistung für zwei Leistungskategorien: Büroraum mit normaler (20 W) und Büroraum mit hoher (47 W) interner Leistung. Die Werte gelten für den Standort Zürich. Die besten Leistungen werden bei nächtlichen Außentemperaturen von 16 - 18 °C erreicht. Sie sind stark von der Erwärmung der Betondecken abhängig. Die Rückkühler selber sind nach den Herstellerangaben zu dimensionieren.

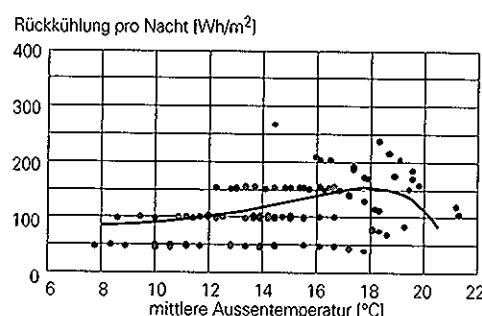
Figur 8-10:

Luftkühler auf dem Dach des Dow-Gebäudes



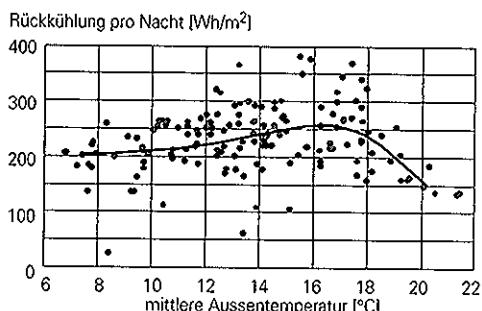
Figur 8-11:

Pro Nacht abgeführte Wärme bei einem Büroraum mit normalen Wärmelasten (20 W/m<sup>2</sup>)



Figur 8-12:

Pro Nacht abgeführte Wärme bei einem Büroraum mit hohen Wärmelasten (47 W/m<sup>2</sup>)



### Thermoaktive Betondecke

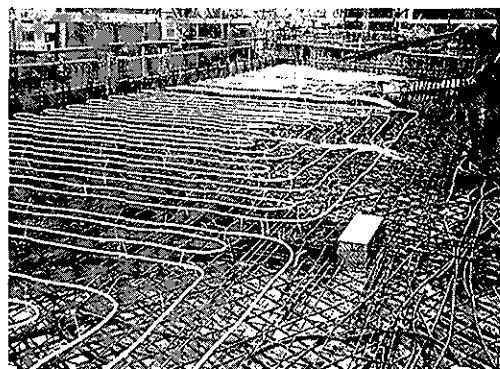
Für die wasserführenden Rohrschläufen werden in der Regel Kunststoffrohre verlegt, wie sie auch für Bodenheizungen verwendet werden. Vereinzelt kommen aber auch Stahlrohre, wie sie früher für Deckenheizungen eingesetzt wurden, zum Einsatz. Beide Systeme sind möglich.

Im Gegensatz zur Bodenheizung müssen die Leitungen bereits im Rohbau, zusammen mit der Deckenarmierung verlegt werden. Dies erfordert eine sorgfältige Planung und eine erhöhte Vorsicht beim Verlegen, da Beschädigungen später kaum reparierbar sind.

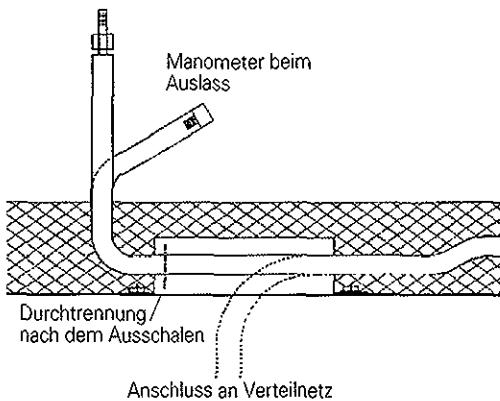
Falls vorfabrizierte Module verlegt werden, wie dies beim DOW-Gebäude erfolgte (Figur 8-13), ist später besser nachvollziehbar, wo bei Bedarf Bohrungen durch die Decke zulässig sind. Die vorgebogenen Rohrelemente – mit einer Rohrlänge von ca. 50 m und ein Rohrabstand von 15 cm – wurden hier 10 cm über die untere Armierung befestigt. Damit eine Entleerung der Leitungen später möglich ist, wurden die Leitungsenden durch eine Kunststoffbox an der Deckenunterseite geführt (Figur 8-15) und vor dem Betonieren der Decken von oben durch Abpressen auf ihre Dichtigkeit geprüft. Erst nach dem Ausschalen der Betondecken wurden die Leitungen in der Kunststoffbox durchtrennt und von unten an die Verteilleitungen angeschlossen (Figur 8-16).



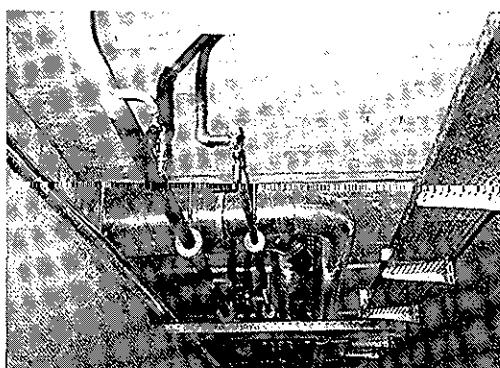
Figur 8-13:  
Abladen der vorfabrizierten  
Leitungsmodule (DOW Ge-  
bäude [8.4], [8.6])



Figur 8-14:  
Direktes Verlegen der Kun-  
ststoffrohre für Heizung und  
Kühlung (Sarinaport-Gebäu-  
de, Fribourg [8.7])



Figur 8-15:  
Vormontierte Anschlussbox  
für vorfabrizierte Leitungs-  
modul (DOW Gebäude)



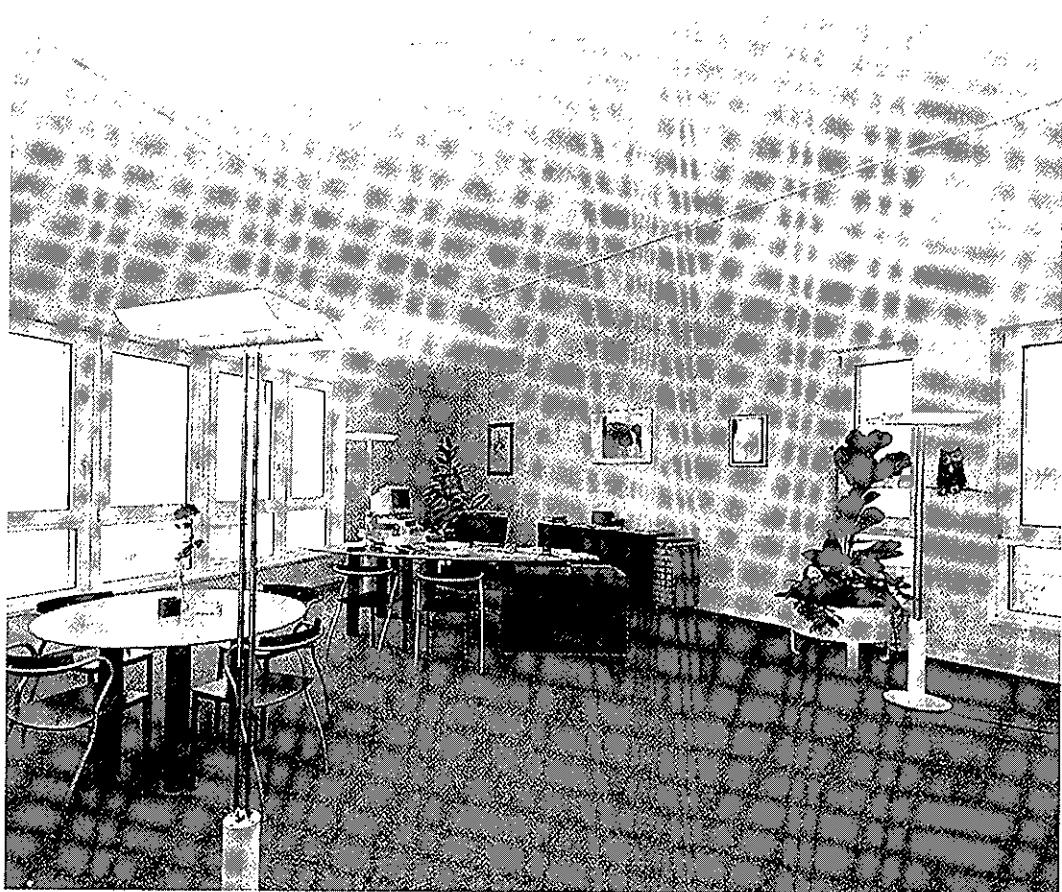
Figur 8-16:  
Anschluss der Rohrregister  
an Verteilsystem im Korridor-  
bereich (DOW-Gebäude)

Thermoaktive Bauteilsysteme ermöglichen frei möblierbare Räume ohne störende Installationen (Figur 8-17). Die freie Betondecke kann allerdings zu Akustikproblemen führen, beispielsweise in Grossraumbüros. Je nach Voraussetzung muss besonders darauf geachtet werden, dass im Raum

gleichwohl genügend schallschluckende Oberflächen und solche für die thermische Ankopplung an die Gebäudemasse vorhanden sind. Gegenwärtig gibt es dazu noch keine optimale Lösung. Praktisch muss immer ein geeigneter Kompromiss gesucht werden.

Figur 8-17:

Büroraum des Sarinaport-Gebäudes. Die integrierte Lösung für Kühlung und Heizung ermöglicht Räume ohne sichtbare Installationen. Die Quelllüftung ist in die Sockelleiste integriert.



#### Literaturhinweise

- [8.1] M. Koschenz, B. Lehmann: Planungsgrundlagen für thermoaktive Bauteilsysteme, EMPA, 1999
- [8.2] M. Koschenz, B. Lehmann: Thermoaktive Bauteilsysteme – Potentialabschätzung und Erfahrungen, 10. Schweiz. Status-Seminar "Energieforschung im Hochbau", EMPA 1998
- [8.3] M. Koschenz, V. Dorer: Praxisgerechtes Dimensionierungsverfahren für Anlagen mit Bauteilkonditionierung, 9. Schweiz. Status-Seminar "Energieforschung im Hochbau", EMPA 1996
- [8.4] R. Meierhans: Neuartige Kühlung von Bürogebäuden – Kombination passiver und aktiver Kühlung, NEFF Projekt 464, 1998 (Bezug EMPA ZEN)
- [8.5] R. Meierhans et. al.: Raumklimatisierung durch nächtliche Auskühlung der Betondecke, 8. Schweiz. Status-Seminar "Energieforschung im Hochbau", EMPA 1994
- [8.6] M. Zimmermann, R. Meierhans: The DOW Building, Headquarters DOW Europe, Horgen/Switzerland – Slab Cooling (Water), Case Studies of Low Energy Cooling Technologies, IEA BCS Annex 28 "Low Energy Cooling", 1998
- [8.7] M. Zimmermann, Ch. Cornu: The SarinaportOffice Building, Fribourg/Switzerland – Slab Cooling and Heating (Water), Case Studies of Low Energy Cooling Technologies, IEA BCS Annex 28 "Low Energy Cooling", 1998

## 9. Lokale Kühlung

Hohe Wärmelasten können mit passiven und hybriden Kühlsystemen nur noch bedingt abgeführt werden. Vor allem wenn sich die Wärme im Raum verteilt, lässt sie sich nur noch schwer abführen. Werden die Wärmelasten jedoch direkt an der Quelle gefasst, bevor sie zur Erwärmung des Raumes führen, können sie noch verhältnismässig einfach abgeführt werden. Technisch am einfachsten wäre das Absaugen der erwärmteten Luft direkt beim Gerät, wie es bereits bei Abluftleuchten realisiert wird. Bei anderen Anwendungen – Photokopierern, PC's etc. – scheitert jedoch dieses Konzept an den erforderlichen Luftleitungen.

Einen neuen Weg geht ein wasserführendes Kühlelement, welches speziell für Arbeitsplätze mit hoher EDV-Dichte entwickelt wurde und bereits mit gutem Erfolg verschiedentlich eingesetzt wird.

Hohe Kühllasten von 60 bis über 200 W/m<sup>2</sup> treten in Handelsräumen und Büros mit dichter Belegung und hoher EDV-Dichte auf. Diese Räume werden üblicherweise mit Kühldecken oder leistungsfähigen Mischluftsystemen gekühlt. Bei den Systemen stoßen bei Lasten über 100 W/m<sup>2</sup> an ihre Leistungsgrenze. Praktisch sind es meistens Zugserscheinungen, welche die Einsatzgrenzen der Kühlsysteme bestimmen.

Auf den ersten Blick widerspricht die Kühlung am Arbeitsplatz dieser Forderung nach Zugfreiheit, ausser man stellt sich eine reine Strahlungskühlung vor. Bei näherer Betrachtung zeigen sich dennoch Möglichkeiten zur Erzeugung eines zugfreien Mikroklimas am Arbeitsplatz. Dabei werden die EDV-Wärmelasten am Arbeitsplatz größtenteils direkt gekühlt und zusätzlich die im Raum verteilten Wärmequellen kompensiert.

Die wichtigsten Eigenschaften des lokalen Kühlkonzeptes :

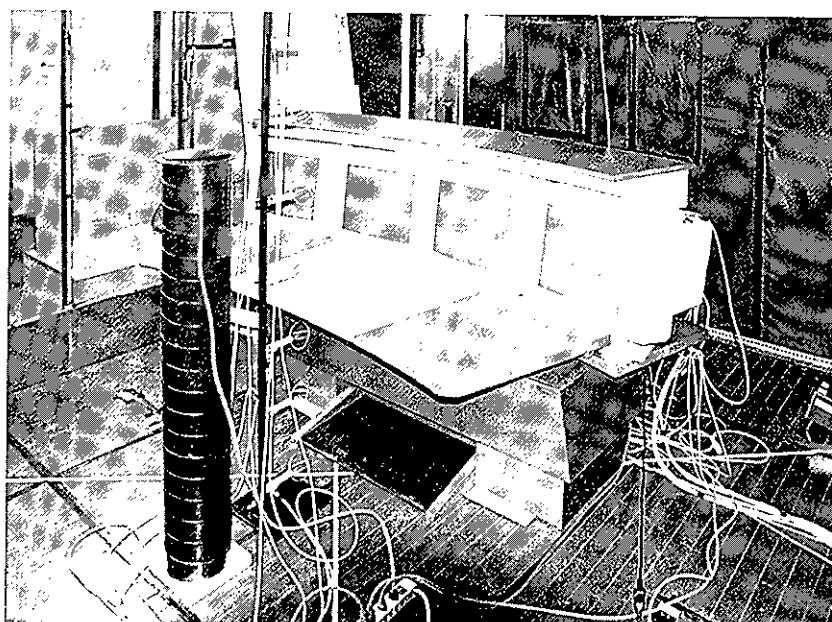
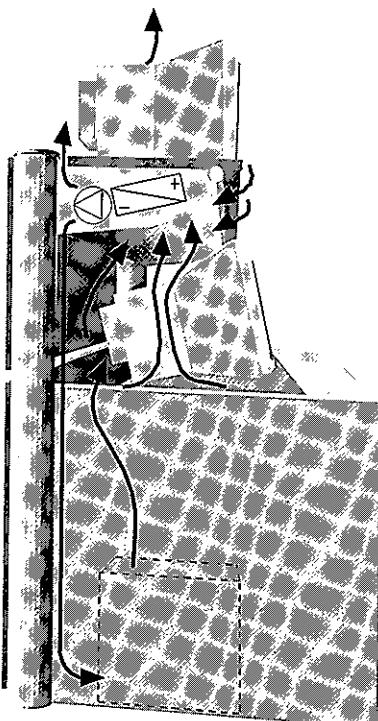
- Kühlwassertemperatur im Bereich von 20 °C
- Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf des Kühlwassers 4 bis 6 K
- Elektrizitätsverbrauch zur Kälteerzeugung und Verteilung max. 10 % der Kühlleistung
- Selbstregulierend: Keine aktiven Regelkomponenten sowie keine Anschlüsse an das Gebäudeleitsystem
- Luftbewegung im Aufenthaltsbereich unter 12 cm/s, das heisst völlige Zugfreiheit



Figur 9-1:  
Hoch installierte Bildschirmarbeitsplätze werden besser lokal gekühlt. Die Abwärme, die hier konzentriert anfällt, kann rasch und effizient abgeführt werden und belasten den Raum dadurch nicht.

## Funktionsprinzip

**Figur 9-2:**  
Funktionsschema des Cool-Top (9.5) Arbeitsplatzes. Die Luft wird direkt über der Wärmequelle abgesogen und anschliessend durch ein wassergekühltes Register geführt. Bereits 20-grädiges Wasser genügt. Ein geräuscharmer Ventilator sorgt für die Luftzirkulation. Er bläst die Luft nach hinten aus, von wo sie teilweise nach unten in den Unterbau strömt und teilweise nach oben abgegeben wird.



Figur 9-3: Versuchsaufbau im Raumklimalabor der EMPA

Das für eine konkrete Anwendung mit Berechnungen und Labormessungen entwickelte Konzept zur lokalen Kühlung ist speziell für EDV-Anwendungen mit einer hohen Dichte von Terminals ausgelegt.

Es lässt sich aber sinngemäß durchaus auch für andere Anwendungen adaptieren. Das Prinzip liegt darin, dass die Wärme möglichst nahe an ihrem Gestehungsort abgefangen wird. Dadurch wird das System nicht nur kleiner, sondern auch effizienter. Durch die relativ hohen Lufttemperaturen in der Nähe der Computerterminals kann bereits mit 20-grädigem Wasser eine sehr gute Kühlwirkung erzielt werden. Das System ist aber auch selbstregelnd, d.h. die Kühlleistung stoppt, sobald keine Wärmelast mehr vorhanden ist. Zudem besteht nie die Gefahr von Kondensatbildung.

Um die Effizienz des Systems zu steigern, erfolgt der Wärmeaustausch nicht rein passiv, sondern wird mit einem kleinen Gebläse verstärkt (Figur 9-2). Der gekühlte Bereich wird so gestaltet, dass praktisch die gesamte Wärme der EDV-Geräte am Arbeitsplatz direkt abgeführt wird. Zusätzlich bildet der Kühlbereich eine Art Wärmesenke, welche weitere Lasten aus dem Raum aufnehmen kann, ohne dabei im Aufenthaltsbereich eine fühlbare Luftbewegung zu erzeugen.

Die Ventilatoren laufen praktisch geräuschlos, so dass keine Lärmbelastung auftritt. Im Gegenteile, die Kühlabläre sind so ausgeführt, dass sie sogar schallschluckend wirken und die Geräusche der EDV-Geräte dämpfen.

Der erste Prototyp wurde in Feld- und Labormessungen auf seine Funktionstüchtigkeit und praktischen Einsatzfähigkeit überprüft. Dabei zeigten sich folgende Resultate:

- Die Kühlleistung wird erreicht und der subjektive Kühlereffekt ist eher besser als erwartet.
- Es wurden keine Akzeptanzprobleme bei den Benutzern festgestellt.
- Die EDV-Verantwortlichen zeigten Zweifel bezüglich des Einsatzes von wassergekühlten Elementen im Bereich der Bildschirme.

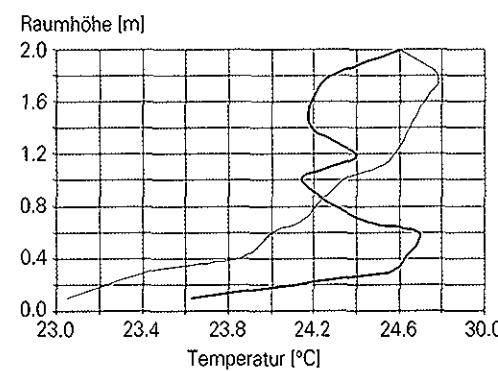
**Leistungsmerkmale**

Im Raumklimalabor der EMPA Dübendorf wurde neben der Kühlleistung auch untersucht, wie sich die Mikroklima-Kühlung zusammen mit Quelllüftungs- und Mischlüftungssystemen verhält. Diese Messungen sollten vor allem aufzeigen, inwiefern sich die Mikroklima-Kühlung in Gebäuden mit bestehenden Lüftungssystemen integrieren lässt.

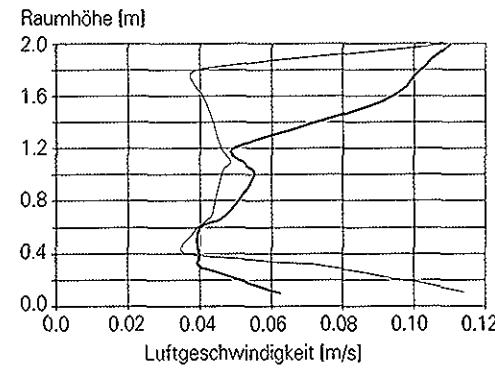
Die Resultate können folgendermassen zusammengefasst werden: Die Raumtemperatur- und Luftgeschwindigkeitsverhältnisse in der Aufenthaltszone angrenzend an die Mikroklima-Kühlzone sind ähnlich wie in einem Raum ohne Wärmelasten. Das heisst, die Wärmelasten im Mikroklima-Bereich beeinflussen das Temperatur- und Luftgeschwindigkeitsprofil des Raumes praktisch nicht.

Die Figuren 9-4 und 9-5 zeigen charakteristische Temperatur- und Luftgeschwindigkeitsprofile für eine Anwendung mit Quelllüftung. Bezeichnend für diese Anwendung ist der kleine Temperaturgradient von 1 bis 2 K zwischen Boden und Decke, sowie die minimale Luftgeschwindigkeit in der Aufenthaltszone von 4 bis 6 cm/sec.

Figur 9-3 zeigt den Messaufbau im EMPA Labor mit dem Pilot-Kühlelement oberhalb der Bildschirme. Das dunkle Rohr im Vordergrund links gibt die Wärme einer Person ab, am Messstativ daneben sind die Temperatur- und Luftgeschwindigkeitssensoren installiert.



**Figur 9-4:**  
Temperaturgradient in einem Bürraum mit Quelllüftung. Die Kühlwirkung auf Arbeitsplatzhöhe ist gut ersichtlich (dicke Linie). Im Vergleich dazu wird auch der Temperaturgradient in der ungestörten Raumecke gezeigt (dünne Linie).

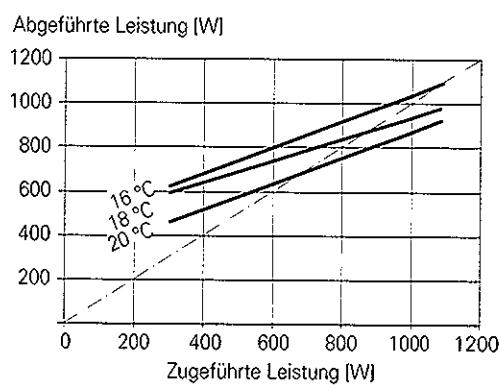


**Figur 9-5:**  
Rauumlufgeschwindigkeiten bei lokaler Kühlung. Sie liegen im gesamten Arbeitsplatzbereich zwischen 4 - 6 cm/s (dicke Linie) und sind somit sehr niedrig. Im Vergleich dazu wird auch Luftgeschwindigkeit in der ungestörten Raumecke gezeigt (dünne Linie).

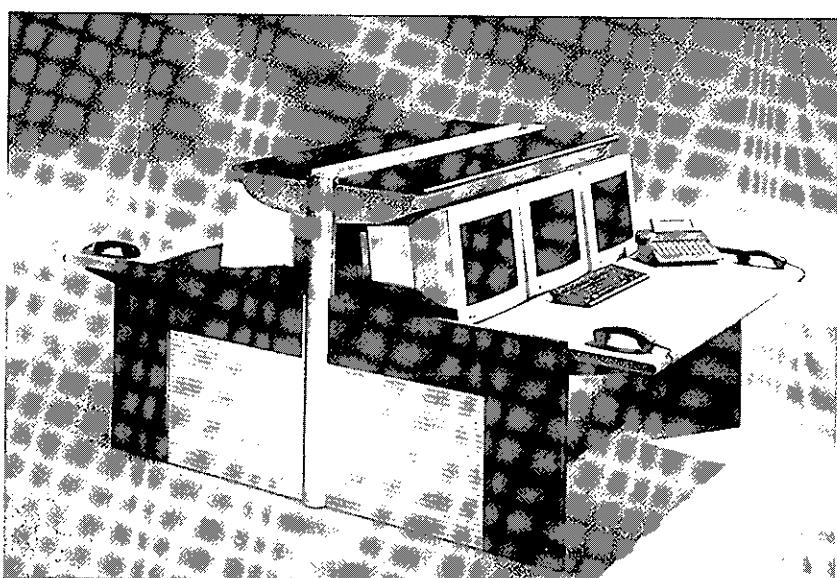


**Figur 9-6:**  
Grösserer Bürraum mit 100 Arbeitsplätzen, welcher über die Kühlelemente gekühlt wird. Die Frischluftzufuhr erfolgt über Schlitzauslässe in der Decke.

## Praktische Anwendungen



Figur 9-7:  
Kühlleistung eines Cool Top  
Händlertisches Z-Com Linear  
(Figur 9-8) bei einer Raumluft-  
temperatur von 24 °C, Vorlauf-  
temperaturen von 16, 18, 20  
°C und einem Massenfluss  
von 200 kg/h



Figur 9-8: Unter der Bezeichnung Cool-Top [9.5] wurden Büromöbel für Bildschirmarbeitsplätze entwickelt, welche die Abwärme über ein wassergekühltes Element direkt abführen. Dadurch sind solche Arbeitsplätze praktisch überall und ohne Klimaanlage möglich.

## Literaturhinweise

Das Kühlelement wurde in ein Pultsystem für Kommunikations- und Handelsarbeitsplätze integriert. Diese Kombination hat sich sowohl bezüglich der Kühlleistung, wie auch der optischen Gestaltung gut bewährt.

Die bisher ausgeführten Anlagen weisen folgende Leistungsdaten und Kenngrößen auf:

- Mittlere Kühlleistung eines Elements (1.8 m breit) 1'000 Watt
- Kühlwasservorlauftemperatur 20 °C
- Luftgeschwindigkeit im Aufenthaltsbereich max. 12 cm/sec

Die Kühlelemente weisen lediglich einen Kühlwasser- und Elektroanschluss auf. Weitere Verbindungen zu Regeleinrichtungen oder Gebäudeleitsystemen sind nicht notwendig. Es findet aufgrund der Intensität der Wärmelast automatisch eine Leistungsregelung von praktisch 0 bis 100 % statt.

Aufgrund der guten Erfahrungen mit der Mikroklima-Kühlung werden auch Anwendungen für den mittleren bis tiefen Kühlleistungsbereich vorbereitet. Da das System als gebäudefeste Installation lediglich eine Kühlwasser-Verteilleitung verlangt, hat es vor allem bei Umbauten ein grosses Potential.

- [9.1] B. Kegel, Th. Rüegg, E. Keller: Komfort und minimaler Energieverbrauch durch Mikroklima-Kühlung, 10. Schweiz. Status-Seminar "Energieforschung im Hochbau", EMPA 1998
- [9.2] Oberlin M., Kegel B.: Messtechnische Ermittlung des Betriebsverhaltens eines Kühlablars, TS Zürich, 1997
- [9.3] Kegel B., Rüegg Th.: Open Source Cooling, Roomvent 98 Stockholm, 1998
- [9.4] Keller E.: Die Lösung für überforderte Klimaanlagen: Cool Top, Power Management 2198
- [9.5] Keller E.: Erich Keller Journal Nr. 11, Sulgen