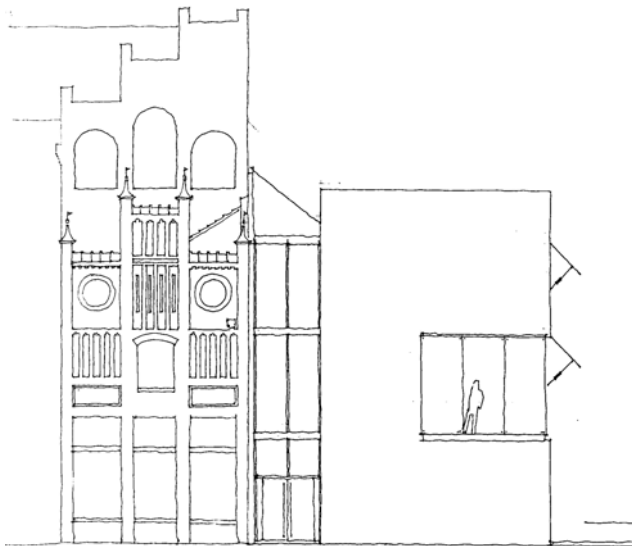


Universität Kassel

ZUB - Zentrum für Umweltbewusstes Bauen



Universität Gesamthochschule Kassel
Fachgebiete Bauphysik / TGA, Gottschalkstr. 28, 34109 Kassel

U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T



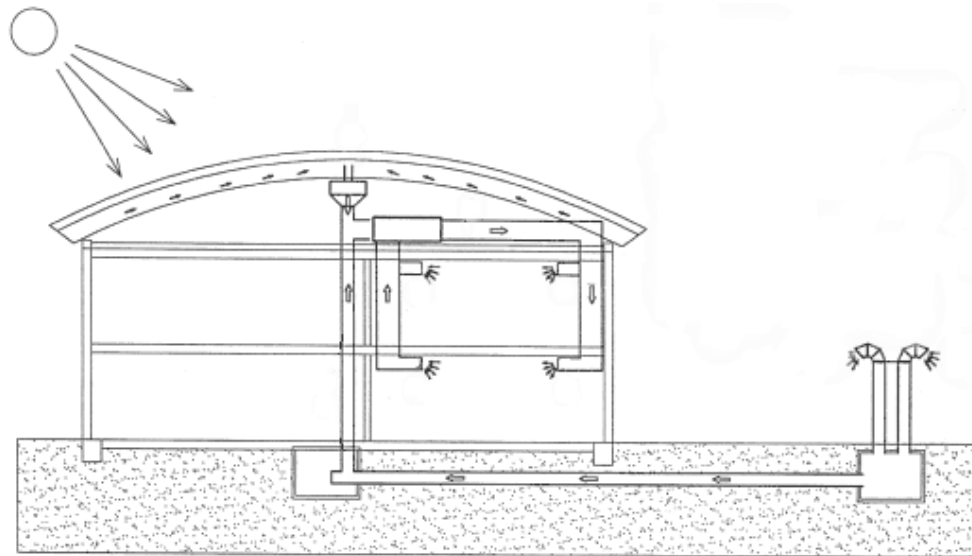
Diplomarbeit I

Nutzung regenerativer
Energien in Gebäuden:
Passive und hybride
Gebäudekühlung

Verfasser
Julia Nothvogel
07.08.2002

Diplomarbeit

im Fachgebiet Bauphysik



Nutzung regenerativer Energien in Gebäuden: Passive und hybride Gebäudekühlung

von
Julia Nothvogel
Matr.-Nr.: 724182
SS 2002

Betreuer:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hauser
Dipl.-Ing. Dietrich Schmidt
Fachbereich 12 - Architektur
Prof. Dipl.-Ing. Stolzenberg
Fachbereich 14 - Bauingenieurwesen

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Entstehen meiner Diplomarbeit beigetragen haben.

Dem Fachgebiet Bauphysik der Universität Kassel danke ich dafür, dass diese Arbeit ermöglicht wurde.

Besonderer Dank gilt natürlich Dietrich Schmidt, der mich und meine Arbeit betreut hat.

Bedanken möchte ich mich auch bei all denen, die mich während meiner Studienzeit und während des Diploms immer unterstützt haben.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe, nur unter Benutzung der angegebenen Quellen angefertigt zu haben.

Kassel, 5.8.2002

Julia Nothvogel

Inhaltverzeichnis

| | |
|--|----|
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Warum ist Gebäudekühlung notwendig? | 2 |
| 1.2 Passive und hybride Gebäudekühlung | 4 |
| 1.2.1 Passive Systeme..... | 4 |
| 1.2.2 Hybride Systeme..... | 4 |
| 2 Kälteerzeugung | 5 |
| 2.1 Geschichtliches | 5 |
| 2.1.1 Sonnenhaus des Sokrates..... | 6 |
| 2.1.2 Alhambra | 7 |
| 2.1.3 Persische Wohnhäuser | 7 |
| 2.2 Passive Systeme | 8 |
| 2.2.1 Natürliche und mechanische Lüftung..... | 8 |
| 2.2.2 Solarkontrolle und Sonnenschutz | 13 |
| 2.2.4 Effektivität passiver Systeme | 20 |
| 2.3 Hybride Systeme | 22 |
| 2.3.1 Verdunstungskühlung (adiabatische Kühlung): | 22 |
| 2.3.2 Kühlen mit dem Erdreich..... | 25 |
| 2.3.3 Gebäudekühlung mit Grundwasser | 35 |
| 2.3.4 Strahlungskühlung | 38 |
| 2.3.5 Lokale Kühlung | 42 |
| 2.3.6 Effektivität hybrider Systeme..... | 43 |
| 3 Kälteemission | 44 |
| 3.1 Bauteilaktivierung - Thermoaktive Bauteilsysteme | 44 |
| 4 Fallbeispiele | 47 |
| 4.1 Erdhäuser | 47 |
| 4.2 Skythermhaus | 49 |
| 4.3 Regenwasserzisterne zur Gebäudekühlung | 50 |
| 4.4 Meerwasserkühlung | 51 |
| 4.5 Strahlungskühlung und Solarheizung | 53 |
| 5 Eigene Ansätze zur Gebäudekühlung | 54 |
| 5.1 Flusswasserkühlung | 54 |
| 5.2 Regenwassernutzung | 55 |
| 6 Zentrum für Umweltbewusstes Bauen - ZUB | 56 |
| 6.1 Kühllast eines Büroraumes | 61 |
| 6.1.1 Definitionen | 61 |
| 6.1.2 Kühllastberechnung nach VDI 2078 für das ZUB | 62 |
| 6.2 Kühlleistung der Sohlplatte | 67 |
| 6.2.1 Überschlägige Rechnung nach VDI 4640..... | 67 |
| 6.2.2 Wärmeübergang zwischen Bodenplatte und Erdreich nach GF2DIM..... | 69 |
| 6.3 Energieverbrauch | 76 |
| 6.4 Alternative zur Sohlplatte | 77 |
| 6.5 Ergebnisdiskussion | 79 |
| 7 Schlusswort | 81 |
| 8 Quellenangaben | 83 |

1 Einleitung

Passive bzw. hybride Gebäudekühlung bedeutet, dass die Aufrechterhaltung eines angenehmen Raumklimas ohne oder mit geringem Einsatz anlagentechnischer Systeme erfolgt.

In dieser Arbeit wird gezeigt warum Gebäudekühlung notwendig ist und welchen Vorteil passive und hybride Systeme im Gegensatz zu herkömmlichen Klimaanlage haben. Es sind verschiedene passive und hybride Formen der Kühlung zusammengetragen worden, die hinsichtlich ihrer Kühlleistung und Energieeinsparung im Sommer und hinsichtlich ihrer Nutzung im Winter bewertet wurden.

Zusätzliche zu den bestehenden Möglichkeiten Gebäude passiv oder hybrid zu kühlen wurde versucht neue, d.h. eigene Ideen aufzuzeigen. Diese eigenen Ideen sind Gedanken, die im Zusammenhang mit dieser Arbeit entstanden sind, aber nicht wissenschaftlich ausgearbeitet wurden.

Mit einem hybriden Kühlsystem wurde das Zentrum für Umweltbewusstes Bauen (ZUB) ausgestattet. Es handelt sich um eine Sohlplattenrückkühlung in Verbindung mit einem thermischaktivierten Decken- und Bodensystem.

Im Rahmen dieser Arbeit werden rechnerische Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit der Sohlplattenkühlung im ZUB aufgeführt. Hier wird aufgezeigt, inwieweit die Wärmelasten des Gebäudes durch das bestehende Kühlsystem abgeführt werden können und wie dadurch das Raumklima verbessert wird, ohne dass ein Einsatz einer Klimaanlage nötig wird. Dadurch kommt es zu erheblichen Einsparungen im Energiebedarf des Gebäudes.

1.1 Warum ist Gebäudekühlung notwendig?

Die Raumlufftemperatur ist eine wesentliche Komponente des Raumklimas. Die Raumlufftemperatur reguliert den Wärmeaustausch zwischen Körper und Umgebung.

Der Mensch selber ist nur mit wenigen wärmeregulierenden Faktoren ausgestattet. Diese sollten nicht überanstrengt werden, damit das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit nicht sinken. Dies geschieht, wenn die Umgebungstemperatur zu niedrig oder zu hoch ist. Die Behaglichkeitsgrenzen der Raumtemperatur liegen bei Arbeit im Sitzen normalerweise zwischen +20°C und +26°C. Es gibt aber in Bezug auf die behaglichste Raumtemperatur große individuelle Unterschiede. [12]

Die Raumlufftemperatur, die sich in den Räumen eines Gebäudes einstellt, ist durch die thermische Belastung der Räume und Gebäude gegeben. Zu unterscheiden sind dabei zwischen der äußeren Belastung durch das Außenklima und der inneren Belastung. Die innere Belastung entsteht durch die Wärmeabgabe der benötigten Maschinen und Apparate, der Beleuchtung, der Menschen und Tiere (Funktionsnebenwirkungen).

Außenklima und Funktionsnebenwirkungen lassen eine Wärmebelastung in den Räumen entstehen, indem der Raumluff ständig Wärme zugeführt oder entzogen wird. Diese Wärmebelastung wird durch den Wärmetransportwiderstand der Gebäudekonstruktion und durch Speicherung in der Baukonstruktion gedämpft. D.h. die Bauart des Gebäudes hat einen wesentlichen Einfluss auf den aufgenommenen bzw. abgegebenen Wärmestrom, die sog. Wärmelast. Die meisten Gebäude, die heutzutage errichtet werden sind hochwärmegedämmte Gebäude, die es nötig machen, dass die Wärmelasten abgeführt werden. Aber nicht nur die Gebäudehülle macht eine Kühlung der Innenräume notwendig, sondern auch die Nutzung. Gerade bei Bürogebäuden ergeben sich hohe innere Lasten durch die Computerarbeitsplätze und durch die Wärmeabgabe der im Raum befindlichen Menschen. Die hohe Wärmedämmung bei modernen Gebäuden verhindert eine Reduzierung der Wärmelasten über die Außenhülle, wie z.B. über Fugen u.ä.. Die Luftwechsel, die in älteren Gebäuden auf diesem Weg stattfanden sind heute nicht mehr erwünscht, da sie natürlich auch im Winter zu Wärmeverlusten geführt haben. Der Vorteil der durch die gute Dämmung im Winter entsteht, wird im Sommer zum Nachteil und muss auf anderem Weg ausgeglichen werden.

Für eine konstante Raumlufftemperatur muss die Wärmelast kompensiert werden. Das kann z.B. durch eine Kompressionsklimaanlage geschehen. Diese Anlagen können dem Nutzer jeder Zeit und individuell angepasst eine behagliche Raumlufftemperatur liefern. Ein großer Nachteil dieser Klimaanlagen ist allerdings, dass der Energieverbrauch sehr hoch ist. Herkömmliche Klimaanlagen brauchen elektrischen Strom sowohl zur Kältegewinnung, wie auch zur Kälteverteilung.

In dieser Arbeit sollen Möglichkeiten gezeigt werden, wie mit passiven und hybriden Systemen Kälte zur Klimatisierung von Gebäuden gewonnen und verteilt werden kann und zwar ohne oder mit geringem Energieverbrauch.

1.2 Passive und hybride Gebäudekühlung

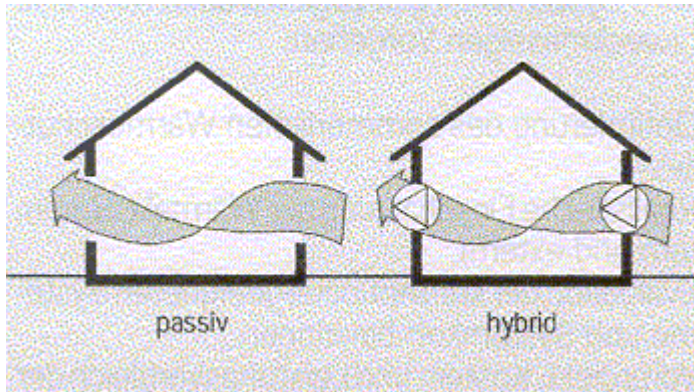


Bild 1-1 Skizze zur Unterscheidung von passiven und hybriden Systemen [24]

1.2.1 Passive Systeme

Passive Systeme zur Gebäudekühlung haben ohne mechanische Hilfsmittel Einfluss auf die Raumtemperatur. Die natürliche Lüftung, bauliche Maßnahmen und Sonnenschutz kann man unter den passiven Systemen zusammenfassen. Eine genauere Beschreibung der einzelnen Maßnahmen ist in Kap. 2.2 zu finden. Die eben genannten Stichworte zeigen bereits auf, dass bei passiven Kühlungen der Energiebedarf gegen Null geht, auch die Investitionskosten sind in den meisten Fällen gering. Allerdings sind solche Maßnahmen in Bezug auf das Kühlergebnis nicht planbar oder regelbar. Hierbei kann nur bis zu einem gewissen Punkt gekühlt werden.

1.2.2 Hybride Systeme

In Kap. 2.3 werden die hybriden Systeme zur Gebäudekühlung behandelt. Die hybriden Kühlsysteme beziehen ihre Kälte aus natürlichen Kältesenken (kühles Erdreich, kalte Nachtluft etc.), die in Verbindung mit haustechnischen Installationen der Raumkühlung dienen. [24]

Das bedeutet, dass zwar zur Verteilung der Kälte Energie benötigt wird, die Kälteerzeugung aber passiv ist bzw. anders herum.

Bei herkömmlichen Klimaanlage dagegen wird für die Kälteerzeugung und für die Verteilung Energie benötigt.

2 Kälteerzeugung

2.1 Geschichtliches

Es gibt einige Beispiele in der Geschichte, die zeigen, dass man sich schon seit jeher Gedanken über den Wohnkomfort gemacht hat.

Es sind hier verschiedene Lösungen aufgezeigt, die die Menschen im Laufe der Zeit genutzt und entwickelt haben um das Raumklima komfortabler zu gestalten.

Die angeführten Beispiele sind natürlich nicht alles, was im Laufe der Jahrhunderte entstanden ist, sondern sie sollen einen kleinen Einblick geben.

In frühester Zeit waren Höhlen die bevorzugte Form des Wohnens. Höhlen waren nicht nur Schutz vor dem Wetter oder wilden Tieren, sondern konnten auch klimatische Vorteile aufweisen. Fels und Erde haben den Vorteil, dass sie durch ihre thermische Trägheit keine großen Temperaturschwankungen zulassen und somit ganzjährig eine gleichmäßige und angenehme Temperatur schaffen.

Wenn es möglich war, sollten die Höhleneingänge nach Süden zeigen, damit im Winter die tiefstehende Sonne ins Höhleninnere gelangen konnte. Im Sommer allerdings war ein Einfall nach Möglichkeit zu vermeiden, z.B. durch auskragende Felsplatten.

Erd- und Felshöhlen werden in manchen Regionen auf Grund ihrer klimatischen Vorteile auch heute noch genutzt. [18]

2.1.1 Sonnenhaus des Sokrates

Sokrates (469 –397 v. Christus) hatte überlegt, dass das Leben in einem Haus angenehm und nützlich sein sollte. Angenehm heißt: im Sommer kühl und im Winter warm.

Im Sommer sollte das Gebäude vor der Sonne geschützt werden, indem das Haus mit einem Vordach ausgestattet war, das den Sonneneinfall im Sommerfall verhindert.

Im Winter war es aber gewünscht, dass das Haus sich durch die Sonnenenergie aufwärmt.

Sokrates baute also ein nach Süden hin offenes, trichterförmiges Haus (siehe Bild 2-1). Die Südseite war so geplant, dass die Sommersonne nicht ins Gebäudeinnere gelangt, dass aber durch die höher gebaute Fassade die Wintersonne das Haus erreicht.

Die Steinwände waren zur Wärmespeicherung gedacht und die niedrige Nordwand diente dazu, dass kalte Winde aus dieser Richtung wenig Angriffsfläche haben. [18]

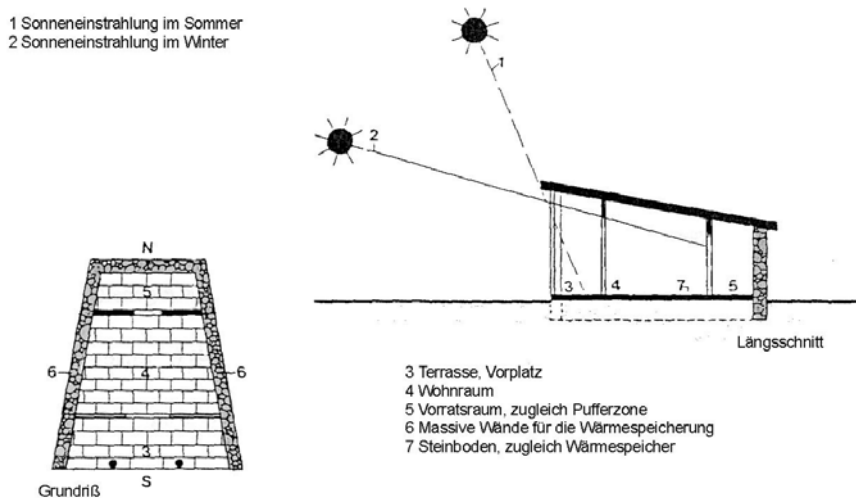


Bild 2-1 Sonnenhaus des Sokrates [18]

2.1.2 Alhambra

Die Alhambra in Granada (gebaut: 13.Jhd.) besitzt viele Komponenten in ihrer Bauweise, die auch im Hochsommer ein angenehmes Raumklima ermöglichen:

- massive Bauweise
- Wasser
- Bepflanzung
- Verschattung der Außenwände

Die Wirkungen und Vorteile dieser Maßnahmen werden im Verlauf dieser Arbeit gezeigt.

2.1.3 Persische Wohnhäuser

In Persien wurden Wohnhäuser entwickelt, die durch bauliche Vorkehrungen eine Klimatisierung des Gebäudes möglich machten (Bild 2-2).

Windtürme sorgten für die Einleitung kühlenden Windes, die bauliche Anordnung der Räume machte es möglich, dass man im Sommer beschattete Räume und im Winter besonnte Räume nutzen konnte.

Auch die Anordnung von Wasser- und Grünflächen diente der Behaglichkeit. [18]

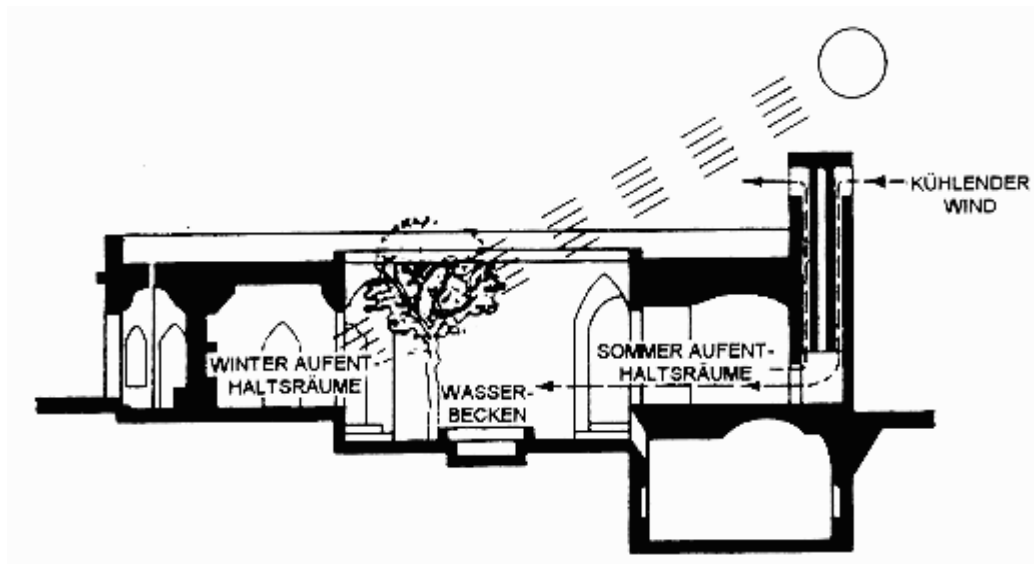


Bild 2-2 Klimatisiertes persisches Gebäude [18]

2.2 Passive Systeme

2.2.1 Natürliche und mechanische Lüftung

Natürliche Lüftung ist im mitteleuropäischen Raum eine Möglichkeit der Gebäudekühlung. Hierbei können über offene Fenster große Luftbewegungen erreicht werden. Natürliche Lüftung ist abhängig von Lüftungsöffnungen und Druckdifferenzen. Die Druckdifferenzen kommen durch Temperaturunterschiede und Wind zustande. Daher ist es am effektivsten die Nachtstunden zur Kühlung der Räume zu nutzen. Selbst im Hochsommer an heißen Tagen kühlen die Nächte fast immer unter 20°C ab. Zwischen Innen- und Außenluft entsteht nun durch das Abkühlen der Außenluft eine Druckdifferenz, die dafür sorgt, dass kühle Luft in die Räume gelangt. Um die Wärmelasten, die sich tagsüber aufgebaut haben wieder abführen zu können, müssen geeignete Rahmenbedingungen erfüllt sein:

- Begrenzung der Wärmelasten, d.h. ist der Wärmeeintrag tagsüber zu hoch, ist die Wirkung der Nachtlüftung nicht ausreichend.
- Speichermassen im Gebäudeinneren, denn die Speichermassen des Gebäudes haben eine ausgleichende Wirkung auf die Raumtemperatur. Je größer die Speichermassen sind, desto gleichmäßiger sind die Innentemperaturen.

Teilweise sind diese Rahmenbedingungen schwer zu erfüllen, denn ein erhöhter Luftwechsel im Gebäude sorgt in den meisten Fällen nur in der Nacht für eine Abkühlung des Raumes. Tagsüber kann bei einem starken Luftwechsel die Speichermasse des Gebäudes erwärmt werden und somit zu einer höheren Raumlufttemperatur führen. Allerdings ist es möglich, dass der Mensch bewegte, warme Luft als angenehm empfindet. Am Tag sollte die Lüftung nur der Frischluftversorgung dienen, nicht zur Kühlung. Die warme Luft sollte nicht ins Gebäudeinnere gelangen, dadurch können hohe Wärmelasten vermieden werden und die Nachtauskühlung bleibt effektiv.[24]

Für Wohngebäude ist die natürliche Lüftung eine gute Option, denn hier kann der Bewohner eine angemessene Nachtlüftung sicherstellen. Bei Bürogebäuden allerdings kann man mit der natürlichen Lüftung kaum eine optimale Kühlung erreichen, da hier die Nachtlüftung oft nicht gewährleistet werden kann. Meist besteht nur die Möglichkeit des Lüftens am Tag, das neben dem Wärmetransport auch die Lufthygiene und die Luftbewegung beinhaltet.

Die natürliche Lüftung kann durch verschiedene Konzepte ermöglicht werden:

- **Fugenlüftung**
Auf Grund der oben erwähnten Druckdifferenzen kann ein Luftwechsel z.B. durch Fensterfugen oder Gebäudefugen erfolgen. Die Art der Lüftung ist nicht regelbar und die Luftwechselrate ist oft zu gering um mit einer Fugenlüftung, den Lüftungsbedarf zu decken. Das bedeutet, dass diese Art der Lüftung auch ungeeignet ist genügend kühle Luft für ein angenehmes Raumklima ins Gebäudeinnere zu transportieren. Auch im Winter können durch die Fugenlüftung Nachteile entstehen. Es kann zu erheblichen Wärmeverlusten kommen und die warme, feuchte Luft die, durch die Fugen strömt kann zu Kondensation im Bauteil führen und damit die betroffenen Bauteile schädigen. [14]
- **Fensterlüftung**
Auch bei diesem Konzept entsteht der Luftwechsel durch Druckdifferenzen. Hier besteht der Vorteil darin, dass durch ein geöffnetes Fenster genügend Frischluft in den Raum gelangen kann. Das Öffnen der Fenster und somit die Frischluftzufuhr kann zeitlich kontrolliert werden. Die Regelung des Luftwechsels ist nur in engen Grenzen möglich, durch verschiedene Fensterstellungen. In der Nacht kann durch gezieltes Fensteröffnen im Sommer dem Raum kühle Luft zugeführt werden. Werden an heißen Tagen tagsüber die Fenster geöffnet, können unerwünschte Wärmeeinträge im Gebäude entstehen. Im Winter kann es, wie auch bei der Fugenlüftung zu Wärmeverlusten führen. [14]

- Schachtlüftung

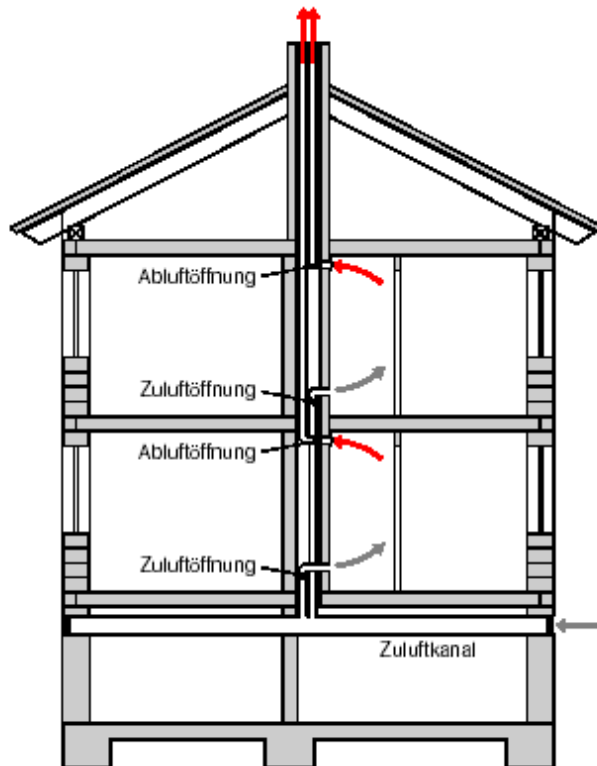


Bild 2-3 Schachtanordnung in einem Mehrfamilienhaus [14]

In manchen Gebäuden sind Räume vorhanden, die auf Grund ihrer Lage keine Fenster haben. Diese innenliegenden Räume sind häufig Sanitärräume und Küchen, die über Lüftungsschächte mit Frischluft versorgt werden.

Dies geschieht über jeweils einen Zuluft- und Abluftschaft.

Hierbei können hohe Luftwechselraten entstehen, da das Schachtsystem eine Schornsteinwirkung hat, d.h. es entsteht ein thermischer Auftrieb in dem Schacht.

Dieser thermische Auftrieb kann nur entstehen, wenn die Außenluft kühler ist als die Raumluft.

Liegen die Außentemperaturen über den Innentemperaturen, kann die warme Luft durch den Schacht ins Gebäudeinnere gelangen.

Im Winter dagegen können auch hier ungewollte Wärmeverluste entstehen. [14]

Die natürliche Lüftung kann ein gutes Kühlergebnis erzielen. Die Effizienz dieser Methode ist aber nur bei optimaler Handhabung gewährleistet. Man kann also einen effizienten Luftaustausch ohne große Kosten erreichen. Aber die verschiedenen Konzepte haben gezeigt, dass man mit dem Lüften oft nur eine Frischluftzufuhr erreicht. Bei falscher Handhabung können ungewollte Wärmelasten in das Gebäude gelangen, aber auch eine Unterkühlung des Raumes ist möglich, da Nachttemperaturen und Windverhältnisse nicht immer vorhersehbar sind. Weiterhin ist die Kühlkapazität von den Außentemperaturen abhängig.

Es ist auch eine Frage der Sicherheit, inwieweit eine Nachtauskühlung z.B. durch offene Fenster gewährleistet werden kann. In höher gelegenen Geschossen ist die Problematik bestimmt geringer, als das im Bereich von Erdgeschossen der Fall ist.

Problematisch kann eine Nachtauskühlung auch dann werden, wenn es draußen zu laut ist und somit die Nachtruhe bei geöffneten Fenstern nicht gewährleistet ist.

Um dem Problem der unkontrollierbaren Lüftung am Tag zu entgehen, ist für Bürogebäude eine mechanische Lüftung von Vorteil, da hier der Luftwechsel konstant und planbar wird. Da im Fall der mechanischen Lüftung anlagentechnische Vorkehrungen getroffen werden müssen, spricht man hier eher von einem hybriden System.

Die Zuverlässigkeit und Regelbarkeit der mechanischen Lüftung stellt die Vorteile gegenüber der natürlichen Lüftung dar. Im Winter spielt die Raumkühlung durch das Lüften keine Rolle mehr, hier steht die Lüfthygiene im Vordergrund. Geöffnete Fenster können im Winter zum Problem werden, denn Lüftungswärmeverluste können den Heizwärmeverbrauch deutlich erhöhen. Die mechanische Lüftung ist auch hier eine Möglichkeit den Räumen kontrolliert Frischluft zuzuführen.

Hygienische Luftverhältnisse, Vermeidung von Feuchtschäden und Schimmelbildung und die Möglichkeit Energie zu sparen sind durch den Einbau von Einzellüftern möglich. Solche Einzellüfter gewährleisten eine Grundlüftung mit geringem Luftwechsel. Sollte eine intensivere Lüftung kurzzeitig notwendig werden, so ist auch das möglich. Ein weitere Vorteil ist, dass die Luft über schalldämmende Zuluftelemente einströmen kann. Dies kann die Bewohner vor unerwünschtem Lärm schützen, da auch die Fenster nicht zum Luftaustausch genutzt werden und somit geschlossen bleiben können. [3]

Die mechanische Lüftung nutzt Ventilation um die für die Lüftung nötigen Druckdifferenzen zu erzeugen. Eine andere Möglichkeit Druckdifferenzen zu erzeugen, ist es die Raumluft abzusaugen, dadurch entsteht ein Unterdruck und dieser zieht durch Fugen oder Zuluftöffnungen die Außenluft nach.

Weiterhin kann man die Luft an bestimmten Stellen zu- und abzuführen. Erreichen kann man das, indem man Ventilatoren für die Zu- und Abluft nutzt. Eine mechanische Lüftung kann auch bei einem hohen Geräuschpegel in der Umgebung des Gebäudes nützlich sein. Es ist möglich, die Lüftungsöffnungen schalldämmend auszubilden, so dass der Lärm weder durch geöffnete Fenster noch über die Lüftungsöffnungen eindringen kann. Aber auch bei der mechanischen Lüftung steht die Lufthygiene im Gebäude im Vordergrund. Wenn die Luftwechsel allerdings groß genug sind und somit nachts ausreichend kühle Luft in das Gebäude gelangt, kann die Lüftung durchaus der Gebäudekühlung dienen.

2.2.2 Solarkontrolle und Sonnenschutz

Die Regulierung des Sonneneinfalls in das Gebäude ist eine der einfachsten, günstigsten und wirkungsvollsten Methoden der Gebäudekühlung. Wobei hier dem Gebäude nicht direkt Kälte zugeführt wird, sondern das durch die Vermeidung oder Verminderung der direkten Sonneneinstrahlung das größte Wärmelast-Potential begrenzt werden kann.

Der Sonnenschutz kann durch vorspringende oder überragende Bauteile, Sonnenschutzgläser, starre und bewegliche Sonnenschutzanlagen, sowie durch Vegetation erreicht werden. Allerdings müssen für die jeweiligen Gebäude ortspezifisch richtige Lösungen gefunden werden, da die Kenntnisse der Sonnengeometrie berücksichtigt werden müssen, wobei auch Mechanik, Thermodynamik und Optik eine wichtige Rolle spielen.

2.2.2.1 Architektonischer Sonnenschutz

Es lässt sich durch eine klimagerechte Bauweise die Wärmelast klein halten. In gewissen Grenzen kann diese Wärmelast auch beeinflussbar gemacht werden, z.B. durch Außenjalousien. Hierzu muss sich die Raumlufttemperatur allerdings unter dem Einfluss der Wärmelast und der wechselnden Außenlufttemperatur in gewissen Grenzen ändern dürfen. Durch eine sinnvolle Steuerung des Förderstromes gelingt es dann u.U. auch ohne Kühlenergie, das Raumklima während des gesamten Sommerhalbjahres innerhalb eines gewünschten Bereiches zu halten.

Im Mittelmeerraum und vorwiegend in der Vergangenheit wurden die Innenräume der Gebäude durch relativ kleine Öffnungen im Verhältnis zur Masse des Gebäudes vor der Sonneneinstrahlung geschützt. Die meist vorhandenen Innenhöfe werden durch eine schattenspendende Vegetation geschützt. In Griechenland und auf den griechischen Inseln sind diese Bauten charakteristisch, hier kommt noch dazu, dass viele Fassaden weiß gestrichen sind (siehe Kap. 2.3.4, Bild 2-14). Dies verhindert die sommerliche Aufheizung. [8]

Im Jemen, wo man ebenfalls kleine Öffnungen in den Fassaden findet, macht man sich für die Fassaden die Wärmespeicherfähigkeit von luftgetrockneten Lehmziegeln zu nutze. Die kleinen Öffnungen verhindern auch hier eine zu hohe Sonneneinstrahlung. Die Speicherkapazität der Ziegel hat die Aufgabe die Wärme des Tages aufzunehmen und nachts phasenweise verschoben an die Innenräume abzugeben, da es in den Wüstenstädten nachts sehr kalt werden kann. [8]

2.2.2.2 Beschattung

Aber nicht nur kleine Gebäudeöffnungen sind konstruktiver Sonnenschutz, sondern auch große Dachüberstände und überragende Bauteile (Balkone u.ä.) die Schatten spenden.

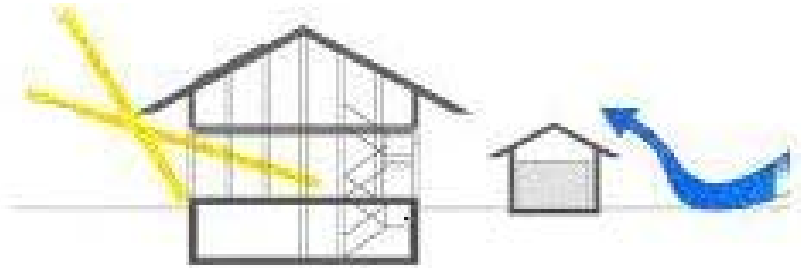


Bild 2-4 Verschiedene Einstrahlwinkel der Sonne, Garage dient als Windschutz [27]

Diese überragenden Bauteile können je nach Stand der Sonne verhindern, dass Wärmestrahlung in das Gebäudeinnere gelangt.

Solche Schutzmaßnahmen sind starre Konstruktionen und sind somit nur für bestimmte Sonneneinfallswinkel ausgelegt. Das bedeutet, dass die Sonne z.B. im Hochsommer durch den Dachüberstand daran gehindert wird das Gebäude zu erwärmen, im Frühjahr und Herbst, wenn die Sonne niedriger steht, könnte die Sonne durchaus auf die Fassade treffen.

Ist aber der Überstand so groß, dass jeder Sonneneinfall abgehalten wird, kann man im Winter nicht von der Sonnenwärme profitieren. Solche Schutzmaßnahmen sind starre Konstruktionen, die nicht beliebig auf den jeweiligen Einfallswinkel der Sonne eingestellt werden können. Starre Bauteile haben den Vorteil, dass sie leicht zu integrieren sind (beim Neubau) und geringe Wartungskosten aufweisen.

Falls der Überstand des starren Bauteils nicht zu groß ist, kann man im Winter auch die Wärmeenergie aus der Sonne nutzen.

Die Investitionskosten und die Betriebskosten (Wartung u.ä.) sind sehr gering. Doch auch die Energieeinsparungen sind nicht sehr hoch, da sich ein Gebäude auch über andere Hüllflächen aufwärmen kann. Über das Dach können große Wärmeeinträge erfolgen, da es eine große Fläche aufweist, die im Kontakt mit der Sonne steht und dadurch ein direkter Strahlungsaustausch stattfinden kann. Zudem kann diffuse Sonnenstrahlung die Fensterflächen immer noch erreichen und auch Wärme ins Gebäude bringen.

Ein behagliches Raumklima ist also allein durch Beschattung der Fenster nicht zu erreichen. In Kombination mit anderen passiven Maßnahmen ist sie jedoch sehr sinnvoll, da z.B. mit der Nachtauskühlung eine geringere Wärmeenergie aus dem Gebäude abgeführt werden muss.

2.2.2.3 Fassadenbepflanzung und Dachbepflanzung

Ein guter Sonnenschutz kann auch eine Fassadenbepflanzung sowie die Begrünung des Daches sein. Die Fassade und die Dachhaut werden vor direkter Sonneneinstrahlung und somit auch vor Hitze und Trockenheit geschützt. Fassadenbewuchs wirkt auf das Hausklima und dessen Umgebung als Wärmedämmung, Wind-, Regen- und Schallschutz, Kühlung und Luftverbesserer. Das Luftpolster zwischen dem Blattwerk und der Wand verringert den Wärmetransport von der Wand zur Außenluft, wie etwa ein zusätzliches doppelt verglastes Fenster. Da die Fassade im jahreszeitlichen Rhythmus unterschiedlicher Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist, ist es sinnvoll, an Südfassaden blattabwerfende Pflanzen einzusetzen, um über die Wärmespeicherkapazität der Massivwand den winterlichen Wärmeverlust zu verringern. Die Nord-, Ost- und Westfassaden sollten mit immergrünen Pflanzen berankt sein, da in diesem Fall die Dämmung des Luftpolsters das ganze Jahr benötigt wird. Hinzu kommen die verringerten Wärmeverluste durch Konvektion, da der Wind nicht mehr am Gebäude direkt angreifen kann. In Abhängigkeit von der Orientierung ergeben sich Funktion und Art der Berankung. Im Norden sind Wärme- und Windschutz ganzjährig gefragt. Hierfür eignen sich immergrüne, dicht rankende Pflanzen, z.B. Efeu, Schattengewächse. Im Süden soll die Außenhaut vor Wärme und direkt einstrahlender Sommersonne geschützt werden. Viele Pflanzen, die im Winter ihre Blätter verlieren bieten sich an: Wein, Knöterich oder auch Obst. Je nach den lokalen Wind- und Besonnungsverhältnissen sollte auf der Westwand (Wetterseite) dichte, immergrüne Bepflanzung gewählt werden; gleiches gilt für die Ostseite, wenn häufig Ostwinde auftreten. In windgeschützten und gut besonnten Fällen kann ähnlich wie bei der Südwand verfahren werden. [4]



Bild 2-5 Fassadenbepflanzung an einer Wand [33]

Bei bepflanzten Dächern sind die Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht deutlich geringer als bei unbegrüntem Dächern. Zusätzlich kann die Begrünung auch ein Schallschutz sein.

Die Pflanzen auf den Dächern sollten allerdings nicht direkt der Sonne und dem Wind ausgesetzt sein.

Bei richtig angepflanzter Fassaden- und Dachbegrünung, kann man durchaus in allen Jahreszeiten das Raumklima damit verbessern. Die Pflanzen können nicht nur für eine angenehme Raumtemperatur sorgen, sondern können auch die Luftqualität verbessern, denn Pflanzen produzieren Sauerstoff, binden Kohlendioxid und andere Luftverunreinigungen.

Im Sommer, wie im Winter kann mit der Fassaden- und Dachbegrünung Energie eingespart werden.

Es ist auch nicht zu befürchten, dass die Außenwände durch die Pflanzen angegriffen werden, denn das Blattwerk schützt die Außenhaut des Gebäudes.

[4]

2.2.2.4 Sonnenschutzgläser

Gläser, die als Sonnenschutzgläser bezeichnet werden haben einen geringen Gesamtenergiedurchlassgrad, der als g-Wert bezeichnet wird. Der g-Wert gibt an, wie viel Sonnenenergie über das Glas ins Gebäudeinnere gelangt. Der g-Wert setzt sich zusammen aus der Sonnenenergie im Wellenbereich zwischen 300 nm und 2500 nm von der der Anteil der Reflexion und der Anteil der Absorption der Gläser abgezogen wird. Je größer der Reflexions- und Absorptionsgrad ist, desto geringer ist die Energie, die in den Innenraum gelangt. Im Gegensatz dazu gibt es Wärmeschutzgläser, die einen hohen g-Wert und einen hohen Lichttransmissionsgrad haben, aber einen niedrigen k-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient). Diese Wärmeschutzgläser sollen die Sonnenenergie durchlassen um so zur Unterstützung der Heizung einen Wärmeeintrag zu gewährleisten. Ein niedriger Wärmedurchgangskoeffizient sorgt dafür, dass die Wärme im Raum nicht zu schnell über die Fenster wieder abgegeben wird. Der Energiedurchlass bei Sonnenschutzgläsern sollte kleiner als 50% sein. Die Tageslichtnutzung sollte aber mitberücksichtigt werden. Bei Wärmeschutzgläsern dagegen liegt der g-Wert bei 60 – 70%. [17]

Sonnenschutzgläser sollten nur dort verwendet werden, wo andere Sonnenschutzmaßnahmen ausscheiden müssen. Eine Einstrahlung der Sommersonne wird verhindert, der Nachteil besteht aber darin, dass auch eine Einstrahlung der erwünschten Wintersonne verhindert wird.

Ein weiterer Nachteil von Sonnenschutzgläsern besteht darin, dass die Investitionskosten wesentlich höher sind als bei normal verglasten Fenstern. Im Sommer wird Energie eingespart, wenn man die Einstrahlung der Sonne reduzieren kann. Wenn aber auch im Winter der Eintrag der Wärmeenergie durch die Sonne reduziert ist, könnte die im Sommer eingesparte Energie im Winter durch zusätzliches Heizen verloren gehen.

2.2.2.5 Sonnenschutzvorrichtungen

Für eine natürliche Klimatisierung von Räumen sind bewegliche Sonnenschutzvorrichtungen am besten geeignet. D.h. am sinnvollsten sind äußere, steuerbare Anlagen.

Bewegliche Sonnenschutzanlagen sind z.B. Jalousien, Markisen u.ä. Vielseitig einsetzbar sind Lamellenstore, die je nach Lichteinfall verstellt werden können. Sie eignen sich speziell für Ost- und Westfassaden mit tiefen Einstrahlwinkeln. Gerade bei Ostfenstern muss man bedenken, dass hier im Sommer schon am frühen Morgen eine starke Sonneneinstrahlung vorkommen kann. Das kann bei unzureichender Beschattung dazu führen, dass sich die Innentemperatur schon in den ersten Stunden um einige Grad erhöht und somit auf den ganzen Tag auswirkt. [8]

Allerdings können auch Südfassaden mit den Lamellenstores geschützt werden. Eine weitere Möglichkeit des Sonnenschutzes bieten Reflexrollos, die meist in die Verglasung integriert sind. Sie bieten eine wirksame Reduktion der Blendung und Spiegelung. Mit einem Lichtdurchlassgrad von 15% schirmen sie das Sonnenlicht sehr gut ab und erlauben trotzdem die Sicht ins Freie. Allerdings lassen sie sich schlecht der momentanen Lichtsituation anpassen.

Normale Außenjalousien können das Sonnenlicht gut abhalten. Dadurch, dass sie außen angebracht sind kann auch weniger Wärme über die Fenster ins Gebäude eindringen. Bei Jalousien oder Rollos, die innen angebracht sind, erreichen die Sonnenstrahlen und damit die Wärme das Fenster und zwischen Fenster und Sonnenschutz entsteht eine Wärmeschicht, die den Raum indirekt aufheizen kann.

Außenjalousien können durch eine helle Farbe die Reflektion der Sonnenstrahlen erhöhen. Allerdings können auch Sonnenschutzvorrichtungen nicht alleine für ein behagliches Raumklima sorgen, da auch hier der Wärmeeintrag über andere Teile der Gebäudehülle stattfinden kann.

Im Winter können z.B. Außenjalousien den Wärmeschutz verbessern. Tagsüber ist es möglich, dass man bei Sonnenschein die Wärme über die Fenster ins Gebäudeinnere aufnimmt und in der Nacht durch die Jalousien verhindert, dass sich der Wärmeeintrag durch die Fenster wieder verringert, denn äußere Sonnenschutzvorrichtungen können den Wärmedurchlassgrad der Fenster verbessern.

2.2.4 Effektivität passiver Systeme

Einzel angewandte passive Systeme sind nicht ausreichend um im Gebäude ein angenehmes Raumklima zu schaffen.

Dagegen sind Kombinationen aus mehreren Passivsystemen durchaus in der Lage das Gebäudeklima komfortabel zu machen.

Ein Beispiel in Portugal zeigt, dass ein komfortables Raumklima auch in wärmeren Regionen mit Hilfe von passiver Gebäudekühlung erreicht werden kann. Dieses Beispiel zeigt ein Wohnhaus, das durch Nachtauskühlung und guten Sonnenschutz das Wohnen darin ohne Klimaanlage möglich macht.

Tagsüber, wenn es draußen wärmer ist als im Inneren, werden die Fenster und Türen geschlossen gehalten. Die Fensterflächen sind mit gutem Sonnenschutz ausgestattet. Da die Bewohner am Tage nicht zu Hause sind, können diese Maßnahmen ohne Probleme eingehalten werden. Die Erdgeschossfenster sind mit Gittern versehen, die die Sicherheit gegen Einbruch erhöhen und somit das Öffnen der Fenster in der Nacht ermöglichen. Nachts wenn die Temperaturen gesunken sind kann also eine Nachtauskühlung stattfinden. Zum Lüften können Fenster genutzt werden, die evtl. im Schatten liegen und so wenig Wärme aber frische Luft ins Haus lassen. [25]

Die rein passiven Systeme zur Gebäudekühlung können also auch im Hochsommer ein angenehmes Raumklima schaffen. Gerade für Wohnhäuser in gemäßigten Klima ist keine Klimaanlage notwendig, wenn man Kombinationen aus den verschiedenen Möglichkeiten der passiven Kühlung nutzt.

Diese Entscheidung ist natürlich auch vom persönlichen Wohlbefinden der jeweiligen Bewohner bzw. Nutzer abhängig. Außerdem ist zu berücksichtigen, ob gewisse Maßnahmen ausgeführt und eingehalten werden können. Die Nachtauskühlung mit großen Fensteröffnungen könnte z.B. ein Sicherheitsproblem darstellen und Sonnenschutzgläser sind häufig ein finanzielles Problem.

Bei gewerblich genutzten Gebäuden dagegen ist es schon nicht mehr so leicht ein angenehmes Raumklima mit rein passiven Systemen zu erreichen, da dort noch ein Wärmeeintrag aus anderen Wärmequellen in die Raumluft stattfindet, der in Wohngebäuden wenig bis gar nicht vorhanden ist (z.B. Maschinen, Computer, Lampen u.ä.).

Weiterhin zu betrachten sind auch die passiven Systeme im Hinblick auf die Wirksamkeit im Winter, falls diese überhaupt vorhanden ist.

Wie oben bereits erwähnt hat die natürliche Lüftung keine positiven Auswirkungen auf die Wärmegewinne im Winter. Es könnte hier eher dazu führen, dass man durch das Lüften Wärmeverluste hat.

Starrer Sonnenschutz kann die Wärmegewinne im Winter verkleinern oder sogar ganz verhindern.

Positiv im Winter ist die Fassadenbepflanzung, die nicht nur vor der Sonnenwärme schützt, sondern auch davor schützt das die Wärmeverluste über die Fassade zu groß werden.

Um die positiven Eigenschaften der einzelnen Systeme ausnutzen zu können, muss eine optimale Nutzung vorausgesetzt werden. Um dieses Optimum zu erreichen müssen die Nutzer motiviert und unterwiesen werden.

2.3 Hybride Systeme

2.3.1 Verdunstungskühlung (adiabatische Kühlung):

Die Verdunstungskühlung resultiert aus Partialdruckdifferenzen an der Phasengrenze zwischen Wasser und Luft. [2]

In der Regel ist die Luft ungesättigt, so dass eine Diffusion des Wasserdampfes in die Luft stattfindet. Das heißt man bringt Feuchtigkeit in die Luft ein, die dann verdunstet. Um Wasser zu verdunsten bzw. zu verdampfen muss eine gewisse Wärmeenergie aufgebracht werden. Diese Wärmeenergie wird der Luft entzogen, die dadurch kühler wird. Diese Temperaturdifferenz zeigt den Energieverbrauch zur Verdampfung des Wassers

($\Delta_{\text{vaph}} \hat{=}$ Verdampfungsenthalpie). Die Enthalpie ist das thermodynamische Potential über das eine Änderung des Energiehaushaltes der Luft ausgedrückt wird.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten der Kältegewinnung durch Verdunstung:

- Dachberieselung

Diese Form der Verdunstungskühlung ist eine interessante Idee für Flachdächer. Die meisten indirekten Wärmeeinträge finden über das Dach statt.

Es ist möglich über Düsen auf dem Dach, die einen Wasseranschluss haben, das Dach zu berieseln und so mit Wasser zu bedecken. Die Berieselung findet in der Nacht statt. Tagsüber kann dieser Wasserfilm verdunsten, wobei viel Wärmeenergie verbraucht wird, die somit das Gebäude nicht aufheizen kann. [15]

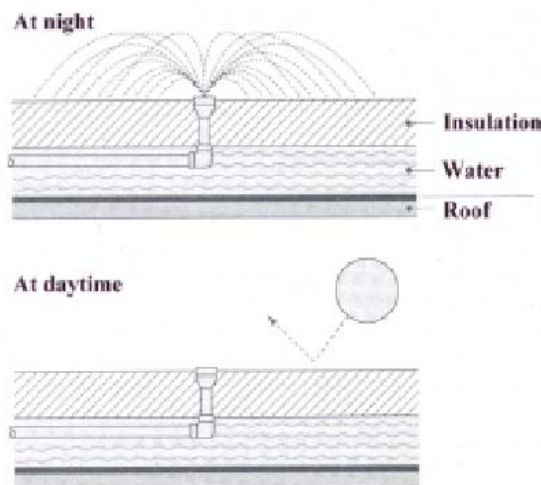


Bild 2-5 Prinzip der Dachberieselung [26]

Das System kann dem Gebäude individuell angepasst werden und ist in gewissen Grenzen kontrollierbar. Durch die Messung der Dachtemperatur und der Bestimmung der Temperaturschwankungen kann die benötigte Wassermenge kalkuliert werden. Das Ziel ist Kühlung mit so wenig Wasser wie möglich. Wasser ist gerade in heißen und trockenen Gebieten sehr wertvoll und sollte nicht nutzlos verwendet werden.

- Dachteiche

Das System der Dachteiche ist eine einfachere Lösung im Gegensatz zu der Berieselung. Hierbei werden Dachteiche auf Flachdächern installiert. Diese müssen allerdings während des Tages beschattet werden, z.B. durch eine bewegliche Isolierung um eine Überhitzung zu vermeiden. [25]

- Zirkulierende Wasserschicht

Das Wasser wird über die Dachoberfläche geleitet. Durch die Geschwindigkeit, die durch die Bewegung entsteht, steigert sich der Verdunstungsprozess und damit auch die Kühlleistung.

Das abgekühlte Wasser wird im Keller gespeichert und zirkuliert von da aus im Gebäudeinneren und kühlt dieses ab. [25]

- Befeuchtung der Abluft

Hierbei wird der Luftstrom, der aus den Innenräumen geleitet wird befeuchtet und somit heruntergekühlt. Die gewonnene Kälte kann über ein Wärmerückgewinnungs-System (WRG) genutzt werden.

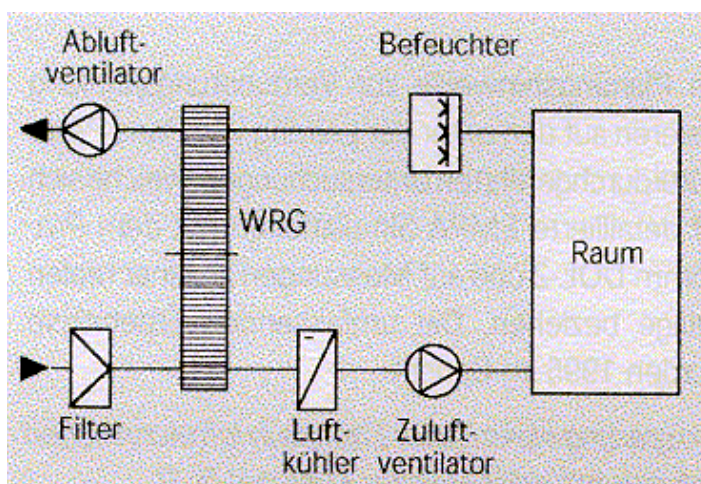


Bild 2-6 Prinzipschema der Abluftbefeuchtung [24]

- Befeuchten der Zuluft

Die direkte Befeuchtung der Zuluft ist im mitteleuropäischen Klima nicht zu empfehlen, da die hohe Luftfeuchtigkeit die Wärmeabfuhr des menschlichen Körpers erschwert. Der Schweiß des Körpers kann nicht normal verdunsten und verbleibt unangenehm auf der Haut. [24]

- Sorptionsgestützte Klimatisierung

Die sorptionsgestützte Klimatisierung ist eine Weiterentwicklung der Verdunstungskühlung. Sie basiert auf dem Prinzip der Trennung von Kühlen und Entfeuchten. Wo bisher eine Ausscheidung des Wassers als Wasserdampf stattfand, wird dieser nun mit Hilfe hygroskopischer Materialien gebunden. Im Gegensatz zu den üblichen Kompressionskältemaschinen, die elektrischen Strom zur Kälteerzeugung benötigen, wird bei der sorptionsgestützten Klimatisierung Wärmeenergie zum Antrieb genutzt. [2]

Bei hohen internen Lasten ist eine adiabatische Kühlung nicht alleine ausreichend, um die nötige Kühlleistung zu erbringen. Bei alleiniger Kühlung durch die Verdunstungsanlage sollte die Kühllast nicht mehr als $150 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{d})$ betragen. [24]

In Kap. 6 (Zentrum für umweltbewusstes Bauen) wird für einen Büroraum eine Kühllast von $927,1 \text{ W}$ errechnet. $150 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{d})$ entsprechen bei 10 h/d und einer Raumgröße von $24,39 \text{ m}^2$ $365,85 \text{ W}$.

Da die Verdunstungskühlung keine rein passive Form der Gebäudekühlung ist, wird während des Betriebs sogenannte Hilfsenergie verbraucht. Diese Energie dient zwar nicht direkt der Kühlung, sie wird aber benötigt um die Luft zu befeuchten und sie zu verteilen.

Die elektrische Hilfsenergie sollte die Kühlenergie, die gewonnen wird nicht überschreiten bzw. sollte im Verhältnis zur Kühlenergie so gering wie möglich sein. Um dieses zu erreichen müssen verschiedene Bedingungen bei dem Betrieb einer entsprechenden Anlage erfüllt sein.

Der Energieverbrauch für Luftbefeuchtung und Wasserbehandlung sollte möglichst gering sein. Die Rückkühlung des Wärmerückgewinnungs-Systems sollte hoch sein, der Druckverlust dagegen klein, sowie auch die Hilfsenergie. Die Ventilatoren des Systems müssen einen hohen Wirkungsgrad haben. [24]

In den meisten Fällen wird adiabatische Kühlung zusätzlich zu einer herkömmlichen Klimaanlage betrieben. Zudem ist das System an ein Wärmerückgewinnungs-System angeschlossen, welches im Winter zum Heizen genutzt werden kann.

2.3.2 Kühlen mit dem Erdreich

Das Erdreich unter und um ein Gebäude herum kann geothermisch genutzt werden. Ab einer Tiefe von ca. 15 m sind die Erdreichtemperaturen konstant, sie liegt bei ungefähr 10°C. Im Sommer sind die Temperaturen oberhalb der 15 m höher und im Winter liegen sie darunter. Bild 2-7 zeigt die Temperaturkurven des Erdreiches in der jeweiligen Tiefe.

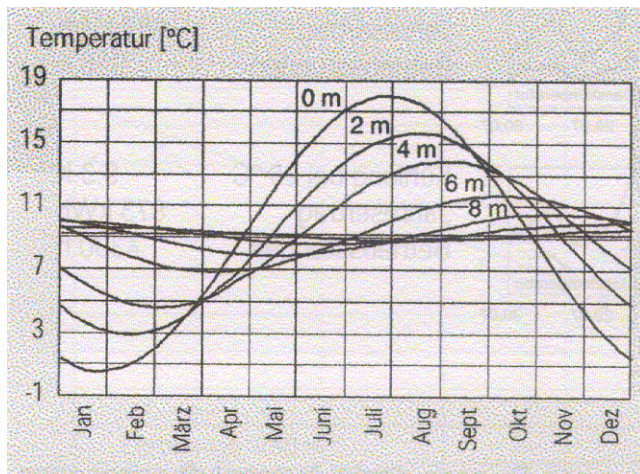


Bild 2-7 Temperaturkurven der Erdreichtemperaturen [24]

Diese Kältequelle kann mit verschiedenen Systemen zur Gebäudekühlung genutzt werden.

Die in Kap. 2.3.3.1 bis 2.3.3.5 beschriebenen Systeme dienen der Kältegewinnung aus dem Erdreich.

Für die Kältegewinnung aus dem Boden ist vor allem die Beschaffenheit des Erdreiches wichtig. Die unterschiedlichen Bodenarten haben auch eine unterschiedliche Leitfähigkeit. Tabelle 2-1 aus der VDI 4640 zeigt das die verschiedenen Bodentypen auch eine unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit λ (W/m^2K) aufweisen. Noch deutlicher ist zu erkennen, dass die wassergesättigten Böden einen wesentlich höheren λ - Wert haben.

Die geologischen Verhältnisse und die Grundwasserverhältnisse des jeweiligen Standortes bestimmen im wesentlichen die thermische Nutzung des Untergrundes. Sie sind entscheidend im Hinblick auf die Auswahl der Methode und deren Auslegung.

| Gestein | Dichte ρ 10^3 kg/m^3 | Wärmeleitfähigkeit λ | | volumenbezogene spezifische Wärmekapazität $\rho \cdot c_p$ $\text{MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ |
|------------------------------|--|------------------------------|-------------------------|---|
| | | W/(m · K) | | |
| | | | typischer Rechenwert | |
| <i>Magmatische Gesteine</i> | | | | |
| Basalt | 2,6–3,2 | 1,3–2,3 | (1,7) | 2,3–2,6 |
| Diorit | 2,9–3,0 | 2,0–2,9 | (2,6) | 2,9 |
| Gabbro | 2,8–3,1 | 1,7–2,5 | (1,9) | 2,6 |
| Granit | 2,4–3,0 | 2,1–4,1 | (3,4) | 2,1–3,0 |
| Peridotit | 3,0 | 3,8–5,3 | (4,0) | 2,7 |
| Rhyolit | ca. 2,6 | 3,1–3,4 | (3,3) | 2,1 |
| <i>Metamorphe Gesteine</i> | | | | |
| Gneis | 2,4–2,7 | 1,9–4,0 | (2,9) | 1,8–2,4 |
| Marmor | 2,5–2,8 | 1,3–3,1 | (2,1) | 2,0 |
| Metaquarzit | ca. 2,7 | ca. 5,8 | (5,8) | 2,1 |
| Glimmerschiefer | ca. 2,6 | 1,5–3,1 | (2,0) | 2,2 |
| Tonschiefer | 2,7 | 1,5–2,6 | (2,1) | 2,2–2,5 |
| <i>Sedimentgesteine</i> | | | | |
| Kalkstein | 2,6–2,7 | 2,5–4,0 | (2,8) | 2,1–2,4 |
| Mergel | 2,5–2,6 | 1,5–3,5 | (2,1) | 2,2–2,3 |
| Quarzit | ca. 2,7 | 3,6–6,6 | (6,0) | 2,1–2,2 |
| Salz | 2,1–2,2 | 5,3–6,4 | (5,4) | 1,2 |
| Sandstein | 2,2–2,7 | 1,3–5,1 | (2,3) | 1,6–2,8 |
| Steinkohle | n.a. | 0,3–0,6 | (0,3) | 1,3–1,8 |
| Ton-/Schluffstein | 2,5–2,6 | 1,1–3,5 | (2,2) | 2,1–2,4 |
| <i>Lockergesteine</i> | | | | |
| Kies, trocken | 2,7–2,8 | 0,4–0,5 | (0,4) | 1,4–1,6 |
| Kies, wassergesättigt | ca. 2,7 | ca. 1,8 | (1,8) | ca. 2,4 |
| Moräne | n.a. | 1,0–2,5 | (2,0) | 1,5–2,5 |
| Sand, trocken | 2,6–2,7 | 0,3–0,8 | (0,4) | 1,3–1,6 |
| Sand, wassergesättigt | 2,6–2,7 | 1,7–5,0 | (2,4) | 2,2–2,9 |
| Ton/Schluff, trocken | n.a. | 0,4–1,0 | (0,5) | 1,5–1,8 |
| Ton/Schluff, wassergesättigt | n.a. | 0,9–2,3 | (1,7) | 1,6–3,4 |
| Torf | n.a. | 0,2–0,7 | (0,4) | 0,5–3,8 |
| <i>Andere Stoffe</i> | | | | |
| Bentonit | n.a. | 0,5–0,8 | (0,6) | ca. 3,9 |
| Beton | ca. 2,0 | 0,9–2,0 | (1,6) | ca. 1,8 |
| Eis (–10 °C) | 0,919 | 2,32 | | 1,87 |
| Kunststoff (PE) | n.a. | 0,39 | | n.a. |
| Luft (0–20 °C, trocken) | 0,0012 | 0,02 | | 0,0012 |
| Stahl | 7,8 | 60 | | 3,12 |
| Wasser (+10 °C) | 0,999 | 0,59 | | 4,15 |

Tabelle 2-1[20]

Es gibt zum einen die Möglichkeit, dass die Luft immer durch den Erdkanal ins Gebäude geleitet wird. Volumenstrom und Betriebszeit wird von der Lüftungsanlage bestimmt. Bei niedrigen Außentemperaturen kann sich das Erdreich dann regenerieren. Bei dieser Möglichkeit, ist nicht gewährleistet, dass man immer ein komfortables Raumklima hat.

Ist es allerdings notwendig, dass hohe interne Lasten abgeführt werden müssen und dass eine maximale Raumlufttemperatur nicht überschritten wird, so ist der Erdkanal alleine nicht in der Lage eine konstante Raumtemperatur zu erzielen, da die Kühlleistungen des Erdreiches bei hoher thermischer Nutzung schnell erschöpft sein kann. Um das zu verhindern, ist es möglich durch ein zusätzliches System der Kälteverteilung, einen Bypass das Erdreich zu schonen. Durch diesen Bypass kann kühle Außenluft direkt ins Gebäudeinnere geleitet werden. Der Bypass ist ein Ersatzsystem, das bei niedrigen Außentemperaturen die geothermische Energie des Erdreiches schonen kann und trotzdem den Klimakomfort sicherstellt.

2.3.2.2 Erdregister

Erdregister sind wie Erdkanäle Rohrsysteme, die in einer Tiefe von 2 m – 4 m horizontal im Erdboden verlegt werden. Der Unterschied besteht darin, dass die Erdregister mit Flüssigkeit gefüllt sind, die die Wärme an das Erdreich abgibt.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten die Erdregister im Boden anzuordnen:

- unter dem Gebäude, bzw. unter der Fundamentplatte
- unter dem Gebäude, aber zwischen Einzel- und Streifenfundamenten
- um das Gebäude herum
- neben dem Gebäude, z.B. in Gräben im Garten

Runde Rohre aus Kunststoff, Zement oder Faserzement werden hauptsächlich für die Erdregister genutzt. Wichtig ist vor allem, dass das System eine lange Lebensdauer hat, da eine Reparatur lagebedingt schwierig und aufwändig ist. Ein Rohrsystem sollte dem entsprechend ein Alter von mehr als 50 Jahren erreichen. Die Rohre sollten in einem Abstand von ca. 1m verlegt werden, denn es könnte bei geringerem Abstand zu gegenseitiger Beeinflussung kommen. Wichtig ist weiterhin, dass die Kellerräume nicht beheizt sind, wenn die Rohre unter dem Gebäude verlegt sind. Bei beheizten Kellerräumen können trotz guter Isolation rund 40 kWh/m² Wärme pro Jahr ins Erdreich eingehen, so dass dieses erwärmt wird. [24]

Zum Kühlen der Räume kann dann z.B. ein Umluftkühlgerät eingesetzt werden. Hierbei kann das Wasser die Luft in den einzelnen Räumen abkühlen und die Wärme abführen. Möglich wäre auch eine Kombination des Erdregister mit thermoaktiven Bauteilen (s. Kap. Bauteilkühlung – Thermoaktive Bauteilsysteme).

Das Bild 2-9 zeigt ein Prinzipschema einer Erdregisteranlage. Hier wird das System zum Wärmegewinn genutzt.

Man hat also mit Erdregistern nicht nur die Möglichkeit ein Gebäude zu kühlen sondern kann es im Winter auch als Heizsystem einsetzen. Bild 2-7 zeigt, dass man dem Boden im Winter in einer bestimmten Tiefe die nötige Wärme entziehen kann.

Es ist möglich das Erdregister an Wärmepumpe und Wärmespeicher anzuschließen.

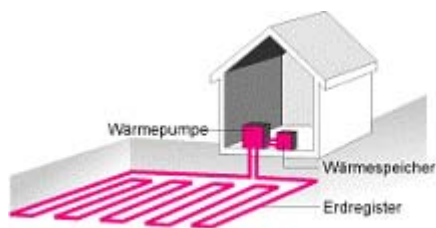


Bild 2-9 Prinzipschema eines Erdregisters [28]

2.3.2.3 Erdwärmesonden

Wie die Erdregister nutzen auch die Erdsonden die thermischen Verhältnisse des Erdreichs aus. Im Sommer wird über den Wasserkreislauf in den Sonden, die größten Teils aus preisgünstigen Kunststoffröhren bestehen Wärme an das Erdreich abgegeben.

Erdsonden sind bis zu 250 m lang und werden je nach Untergrund gerammt, eingespült oder gebohrt.

In einer Tiefe von 200 m herrscht eine konstante Temperatur von 17°C

Für die Kühlanwendung der Sonden werden diese kürzer gewählt. Ab ca.

15 m sind die Temperaturen in den einzelnen Bereichen konstant, also nicht abhängig von der Außenlufttemperatur.

Zwischen 50 m und 100 m liegen die Temperaturen zwischen 12°C und 14°C, für diesen Bereich werden die Erdsonden zum Kühlen ausgelegt. Die Temperaturen sind niedrig genug um eine andauernde und komfortable Kühlung im Gebäude sicherzustellen. [24]

Erdsonden sind aber nicht nur zur Kühlung eines Gebäudes geeignet, sondern auch zum Heizen. Die Erdsonden zur Wärmeengewinnung sind deutlich länger, sie liegen zwischen 100 m und 200 m. In dieser Tiefe liegen die Erdreichtemperaturen zwischen 14°C und 17°C.

Soll das System zum Kühlen und zum Heizen genutzt werden und für jede Periode das entsprechende Ergebnis erzielen, bietet es sich an Erdsonden mit unterschiedlichen Längen in das System zu integrieren.

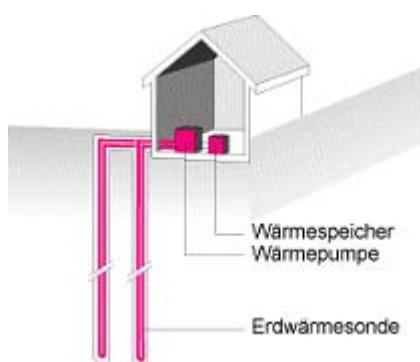


Bild 2-10 Prinzipschema der Erdwärmesonden [28]

Bei fließendem Grundwasser ist mit einer höheren Leistungsfähigkeit der Erdsonden zu rechnen. Bei einer Fließgeschwindigkeit größer als 0,5 m/d, wird die tägliche Regeneration des Erdreiches gewährleistet.

Durch die Nutzung der Wärmesonden im Sommer wie im Winter können die Erdreichtemperaturen ausgeglichen werden. Die Wärme die im Sommer an das Erdreich abgegeben wird, kann im Winter wieder entzogen werden. Allerdings ist es sinnvoll dem Boden im Winter ca. 10 bis 20 % mehr Wärme zu entziehen als ihm im Sommer zugeführt wird. Dieser erhöhte Energieentzug sorgt dafür, dass sich das Erdreich nicht erwärmt. [24]

Ein Erdsondensystem bietet ohne zusätzliche Kältemaschine und Heizungssystem ganzjährig ein angenehmes Raumklima. Da auch die Kosten nicht übermäßig hoch sind, ist es eine gute Alternative zu den üblichen Systemen.

2.3.2.4 Energiepfähle

Energiepfähle zeigen eine weitere Möglichkeit auf das Erdreich als Speichermasse zu nutzen.

Ist es für ein Gebäude erforderlich auf Gründungspfählen errichtet zu werden, können die Gründungspfähle als Energiepfähle ausgeführt werden. Dadurch kann das Erdreich mit geringen Mehrkosten zum Kühlen und auch zum Heizen genutzt werden.

Die Energiepfähle werden aus Beton hergestellt, sie haben im Inneren Kunststoffröhren, in die Wasser geleitet wird. Beton hat eine gute Wärmeleitfähigkeit und ist somit ein ideales Material zur Wärmeabsorption. Wie bei den Erdsonden sind die Pfähle mit ihren Röhren an einen Kreislauf angeschlossen.

Mit bis zu 50 m Länge, sind die Energiepfähle zwar nicht so lang wie die Erdsonden, stellen aber an ihre Umgebung gleiche Ansprüche (fließendes Grundwasser, Art des Untergrundes usw.) und bringen die gleichen Ergebnisse, da sie wie Erdsonden im Sommer zum Kühlen und im Winter zum Heizen genutzt werden können.



Bild 2-11 Gerüst eines Energiepfahls [34]

2.3.2.5 Sohlplattenrückkühlung

Die Sohlplattenrückkühlung ist ein horizontal ausgerichtetes System, dass die Energie des Erdreiches zur Kühlung nutzt.

Bei diesem System steht die Betonbodenplatte des Gebäudes in direktem Kontakt mit dem Erdreich. Diese Bodenplatte ist mit wasserführenden Rohrschlangen ausgestattet.

Dieses Rohrsystem ist mit einem System zur Kälteverteilung gekoppelt. Die Kälte, die das Wasser abgibt wird zur Gebäudekühlung genutzt und wenn das Wasser eine höhere Temperatur erreicht, wird es wieder in die Sohlplatte geleitet und gibt die überschüssige Wärmeenergie an das Erdreich ab.

Auch bei diesem System ist die Beschaffenheit des Bodens wichtig, da dies ein oberflächennahes System ist kann die Kühlleistung des Erdreiches schnell erschöpft sein. Auch hier können zu hohe Wärmeeinträge den Boden erwärmen und somit die Kühlleistung mindern.



Bild 2-12 Zeigt die Verlegung von Rohrschlangen [34]

In Kap. 6 wird die Sohlplattenrückkühlung anhand des Zentrums für umweltbewusstes Bauen näher erörtert.

2.3.3 Gebäudekühlung mit Grundwasser

Es gibt die Möglichkeit Grundwasser direkt zur Gebäudekühlung zu nutzen. In dem Kap. 2.3.2 ist das Grundwasser nur im Zusammenhang mit dem Erdreich behandelt worden. Dieses Kapitel soll Möglichkeiten der direkten Grundwassernutzung zeigen. In Frage kommen vor allem so genannte Aquifer. Aquifer sind Grundwasserspeicher im Locker- oder Festgestein. In deren Poren und Zwischenräumen befindet und bewegt sich Grundwasser. Dieser Untergrund besitzt eine hydraulische Leitfähigkeit, die es möglich macht Wasser aufzunehmen, zu speichern und weiterzuleiten. Am häufigsten sind Aquifer in Verbindung mit weitflächig verbreiteten Sand-, Kies-, Sandstein- oder Kalksteinschichten zu finden, die oben und unten durch gering durchlässige Schichten begrenzt sind. In dem Fall der Aquifer ist das Grundwasser das Kälte- und Wärmespeichermedium zusätzlich zu der Gesteinsmatrix. Diese Reservoirs können zum einen so genutzt werden, wie das Erdreich. Über Erdwärmesonden kann man auch hier Kälte zur Gebäudekühlung erhalten. Erdregister oder Erdkanäle sind oberflächennahe Systeme und können somit nicht eingesetzt werden, da ein größeres Wasservorkommen in den oberflächennahen Bereichen für Bauplanung und Bauausführung schwierig sind.

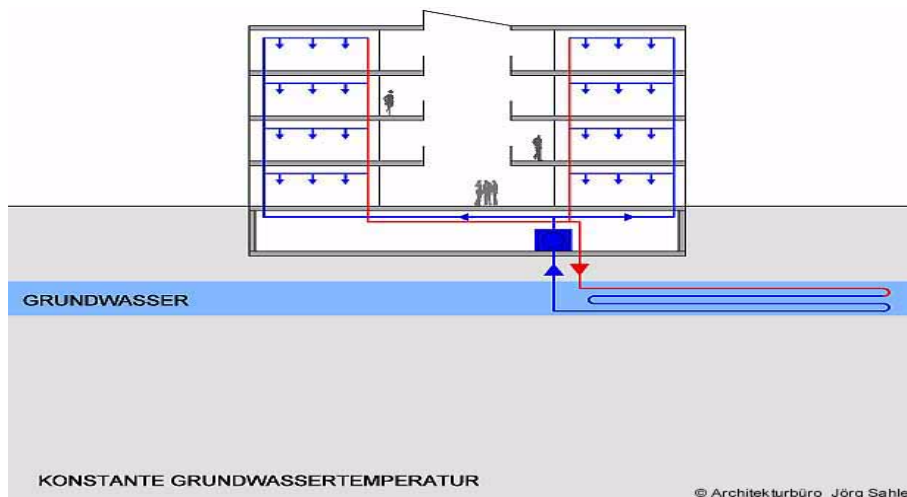


Bild 2-13 Schematische Darstellung der Grundwassernutzung [30]

Bild 2-13 zeigt eine schematische Darstellung der Grundwassernutzung. Hier wird das kühle Grundwasser direkt in das Gebäude geleitet. Bei der Nutzung des Grundwassers spielt dessen Menge eine entscheidende Rolle für die Leistungsfähigkeit des Systems. Zur Kühlung muss ausreichend Grundwasser zur Verfügung stehen, das am besten noch zusätzlich eine gewisse Fließgeschwindigkeit aufweist um effektiv kühlen zu können.

Um die thermische Energie des Aquiferspeichers zu nutzen muss dieser über Bohrungen erschlossen werden. Diese Bohrungen werden dann zu Grundwasserbrunnen ausgebaut.

Diese Brunnen dienen der Grundwasserförderung und leiten dieses auch wieder zurück in den Speicher.

Es gibt zwei verschiedene Möglichkeiten der Förderung und der Wiedereinleitung zur thermischen Energienutzung:

- Ein Brunnen dient zur Förderung und ein Brunnen dient zur Wiedereinleitung.

Bild 2-1 zeigt das Funktionsprinzip.

Im Sommer wird an dem einen Brunnen Kälte entzogen, das kalte Wasser wird zum Kühlen genutzt und erwärmt sich dadurch. Dieses warme Wasser wird nun über einen anderen Brunnen dem Speicher an einer anderen Stelle wieder zugeführt. Hat man diesen Kreislauf ein paar Mal wiederholt entstehen kalte und warme Bereiche um die jeweiligen Brunnen herum.

Im Winter wird die Funktion der jeweiligen Brunnen getauscht, d.h. in der kalten Jahreszeit, wenn das Grundwasser zum Wärmen genutzt werden soll, wird das Wasser aus dem warmen Bereich gepumpt und das abgekühlte Wasser wird in den kalten Bereich eingeleitet.

Diese Funktionsweise nennt man „Wechselprinzip“. [21]

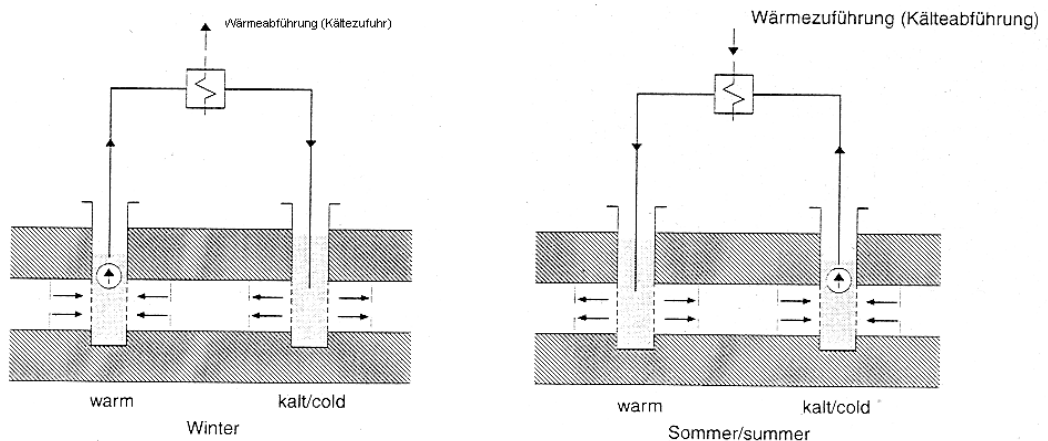


Bild 2-13 Wechselprinzip [21]

- Die zweite Möglichkeit ist, dass das Grundwasser bei beiden Betriebsweisen (Sommer und Winter) mit jeweils dem gleichen Brunnen entzogen wird und mit jeweils dem anderen wieder eingeleitet wird. Das aufgewärmte bzw. abgekühlte Wasser muss sich über ausreichend lange Fließwege bis zum Förderbrunnen wieder regenerieren. Bei dieser Funktionsweise spricht man vom „Durchlaufprinzip“. [21]

Bei beiden Systemen können natürlich auch mehrere Brunnen für die jeweilige Funktion in Frage kommen.

Die Nutzung der thermischen Energie der Aquiferspeicher mit Grundwasserbrunnen ist ganzjährig möglich. Die Grundwassertemperatur erlaubt das Kühlen und Wärmen.

Man hat also ein System zur Raumluftkonditionierung im Sommer und im Winter.

2.3.4 Strahlungskühlung

Die Strahlungskühlung beruht auf dem Prinzip, dass ein Körper langwellige Strahlung an einen anderen Körper abgibt, wenn zwischen ihnen eine Temperaturdifferenz besteht. Das führt bei dem wärmeren Körper zu einer Temperatursenkung. Da die Atmosphäre kühler ist als die meisten Objekte auf der Erdoberfläche, kann man diesen Prinzip zur Gebäudekühlung nutzen. Das zu kühlende Gebäude ist der warme Körper und der Himmel ist der kühle Körper. So kommt ein Strahlungsaustausch zustande. [15]

Um diesen Strahlungsaustausch zum Kühlen zu nutzen gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Weißes Dach

Ein weißes Dach ist die einfachste Art der Strahlungskühlung. Der Vorteil der hellen Farbe besteht darin, dass die Sonnenstrahlung reflektiert wird. Das Dach nimmt so wenig Wärmeenergie auf und speichert wenig davon. In der Nacht kommt es dann zum Strahlungsaustausch vom Gebäude zum Himmel. Da die gespeicherte Energie durch das weiße Dach gering ist, kann die vorhandene Wärme leichter abgeführt werden.

Im Mittelmeerraum, speziell auf den griechischen Inseln gehören weiße Gebäude mit Flachdächern zur traditionellen Architektur. Weiße Dächer, aber auch zusätzlich die weiße Fassade können in den Innenräumen der jeweiligen Gebäude kostengünstig ein angenehmes Klima schaffen. [15]



Bild 2-14 griechischer Ort [29]

Im Bild 2-14 sind die weißen Fassaden der Häuser der Ortschaft Fira deutlich zu erkennen. Zusätzlich sind die Häuser zum Teil in die Felsen gebaut, was das Raumklima weiter verbessern kann (Kap. 2.1).

Die Strahlungskühlung über das weiße Dach oder die weiße Fassade wäre nach der Definition in Kap. 1.2 eine passive Form der Gebäudekühlung. Die nachstehenden Systeme zeigen, dass die Strahlungskühlung hauptsächlich hybrid betrieben wird.

- Bewegliche Isolierung über der Dachhaut

Das Dach, das als Speichermasse dient wird tagsüber mit einer beweglichen Isolierung bedeckt (2-15). Sie sorgt dafür, dass sich das Dach durch die Sonneneinstrahlung nicht zu stark aufheizt. Nachts wird das Dach freigelegt, damit es im direkten Kontakt zur Atmosphäre steht und durch die Strahlung abkühlt. Die Isolierung wirkt hier wie die weiße Farbe, sie verhindert eine zu hohe Erwärmung der Dachhaut.

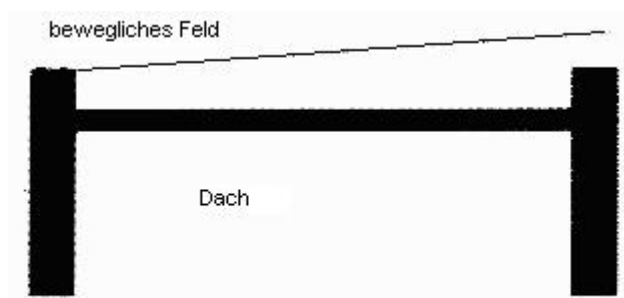


Bild 2-15 [15]

Dieses System ist allerdings auch im Winter sinnvoll zu verwenden. In der kalten Jahreszeit kann die Isolierung tagsüber geöffnet werden um das Dach durch die Sonnenenergie aufzuwärmen. Nachts dagegen wird das Dach bedeckt, damit die Wärme nicht wieder durch die Strahlung verloren geht. [15]

- Beweglich Isolierung mit Wärmespeichermasse

Dieses System ist eine Variante der beweglichen Isolierung. Unter der beweglichen Isolierung befindet sich ein Wasserteich auf dem Dach. Dieses Wasser ist die Speichermasse für die Wärme und zirkuliert auf dem Dach. Tagsüber ist es bedeckt und kühlt sich nachts auf Grund der Strahlung wieder ab.

Diese Variante ist deutlich teurer als eine einfache bewegliche Isolierung. Nicht nur die zusätzlichen Installationen auf dem Dach spielen dabei eine Rolle, sondern auch die Gebäudekonstruktion muss dem Gewicht der Wassermassen angepasst werden.

Die Nutzung im Winter ist mit der der beweglichen Isolierung zu vergleichen. [15]

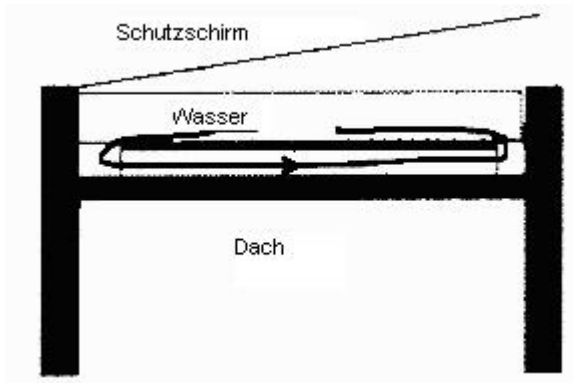


Bild 2-16 [15]

- Flachplatten – Luftkühler

Dieses System wird zur Kühlung von Wasser genutzt. Es ist einem Sonnenkollektor ähnlich, der mit einem Wasserspeicher verbunden ist (Bild 2-17). Es ist ein sehr einfaches Prinzip, das aussieht wie ein Sonnenkollektor ohne Verglasung. Es sind rechteckige Platten, die horizontal installiert werden.

Die Oberseite der Platte besteht aus Metall. Diese Metalloberfläche ist die Strahlungsbasis, die die Kühlung bewirkt. [15]

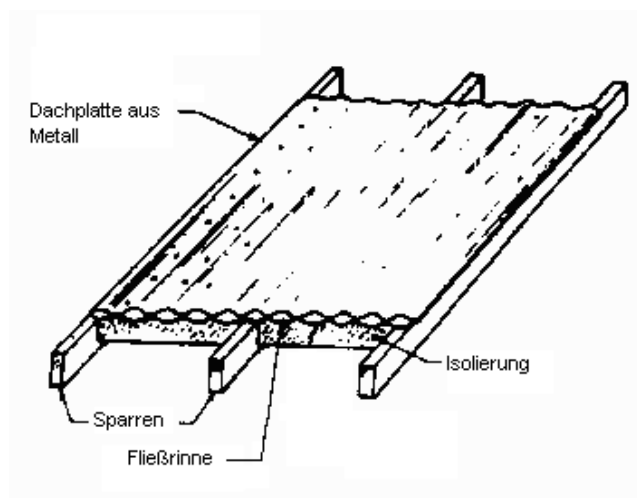


Bild 2-17 [15]

2.3.5 Lokale Kühlung

Lokale Kühlung erfasst die Wärmelasten direkt an der Wärmequelle. Das bedeutet, dass die Wärme abgeführt wird, bevor sie die Raumluft erwärmen kann. Dieses könnte man realisieren, indem man die warme Luft, die von den Geräten ausgeht absaugt. Dieses Prinzip wird schon bei sogenannten Abluftleuchten eingesetzt. Bei Fotokopierern, Computern und anderen Geräten fehlt es allerdings an den nötigen Leitungen, um dieses Konzept durchzuführen. Ein neues Prinzip ist ein wasserführendes Kühlelement, das bei EDV-Arbeitsplätzen genutzt wird. Gerade bei Räume mit einer hohen EDV-Dichte muss darauf geachtet werden die Wärmeeinträge so gering wie möglich zu halten.

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. [24]

2.3.6 Effektivität hybrider Systeme

Die hybriden Systeme zur Gebäudekühlung haben gegenüber den passiven Systemen den Vorteil, dass sie kontrollierbar und regelbar sind.

Die Kühlleistung ist auch bei der hybriden Kühlung begrenzt, kann aber durch verschiedene Systeme gezielt eingesetzt werden.

Diese Art der Kühlung ist besonders für gewerbliche Gebäude interessant, bei denen man ohne konventionelle Klimaanlage auskommen möchte.

Wie Kap. 2.2 gezeigt hat sind passive Systeme nicht in der Lage hohe Wärmeeinträge, wie sie z.B. in Büroräumen durch Computer o.ä. entstehen, abzuführen.

Hybride Systeme dagegen sind durchaus in der Lage ein gutes Raumklima zu schaffen und zu erhalten.

Kap. 4 zeigt unter anderem Fallbeispiele, bei denen mit hybriden Systemen die entsprechenden Gebäude ausreichend gekühlt werden.

Ein weiterer Vorteil gegenüber den passiven Systemen besteht in der möglichen Nutzung im Winter. Einige Systeme können direkt zur Wärmeerzeugung genutzt werden. Besonders die Anlagen, die der thermische Nutzung des Untergrundes dienen sind gut dafür geeignet. Sie entziehen dem Boden je nach Jahreszeit Kälte- oder Wärmeenergie.

Ein Nachteil der hybriden Anlagen gegenüber den passiven Möglichkeiten liegt im Energieverbrauch. Die Kälteerzeugung findet zwar überwiegend passiv statt, die Kälteemission (Kap. 3) dagegen braucht haustechnische Anlagen, die in den meisten Fällen elektrischen Strom benötigen.

3 Kälteemission

3.1 Bauteilaktivierung - Thermoaktive Bauteilsysteme

Betonbauteile haben einen thermischen Speichereffekt, sie können Wärme oder Kälte gut aufnehmen und speichern. Dieser Umstand bedingt eine gute Umsetzung der Bauteilaktivierung. Für dieses System werden in Betondecken und –wände Rohre bzw. Rohrregister eingelegt. Diese Rohre und Rohrregister bilden einen Kreislauf, in den Wasser geleitet wird. Dieses Wasser kühlt die aufgewärmten Bauteile, die dadurch das Gebäudeinnere kühlen. Während der Nutzungszeit wirken die gekühlten Bauteile als Temperatursenken.

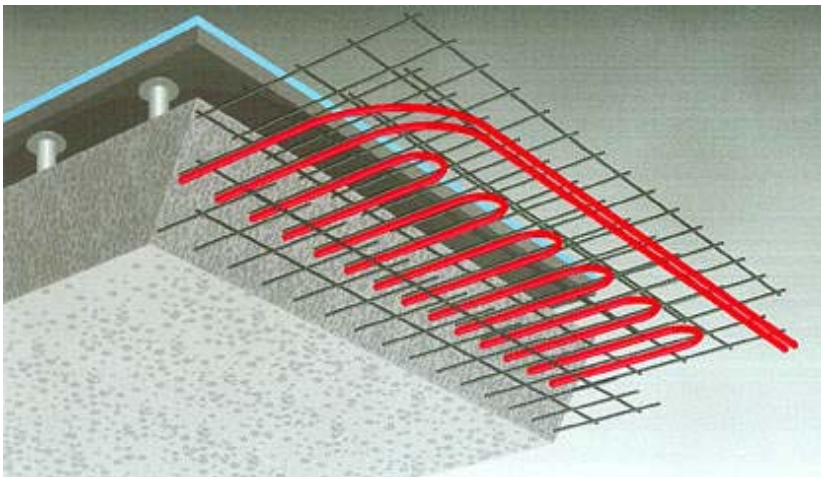


Bild 3-1 Rohrschlangen zwischen der oberen und unteren Bewehrung [34]

Es gibt zwei verschiedene Arten des Kälte- bzw. Wärmeübergangs:

- Konvektion
- Strahlung

Bei der Konvektion wird die Kälte oder die Wärme von der entsprechenden Quelle (z.B. thermoaktives Bauteil) an die Raumluft abgegeben und nimmt so Einfluss auf die Lufttemperatur.

Bei der Strahlung dagegen wird die Kälte oder die Wärme direkt an vorhandene Bauteile (z.B. Decken, Wände usw.) abgegeben, so dass die Raumlufttemperatur nicht beeinflusst wird.

Wichtig bei thermoaktivierten Decken ist, dass diese nicht abgehängt sind. Abgehängte Decken verhindern sowohl bei der Konvektion als auch bei der Strahlung den Wärmeübergang zwischen Raum und Decke. Weitere Voraussetzungen für die Bauteilkühlung sind nicht zu hohe interne Lasten, des weiteren sollte auch der Wärmeeintrag über die Gebäudehülle niedrig sein, die Rückkühlung muss gewährleistet sein und eine kontrollierte Lüftung für die Luftqualität sollte sichergestellt sein.

Um die nötige Kälte zur Bauteilaktivierung zu erzeugen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Umweltfreundlich und energiesparend sind das Kühlen über die Nachtluft, mit der thermischen Kapazität des Erdbodens (siehe Kap. 2.3.2) und durch die Nutzung von Grundwasser (siehe Kap. 2.3.3). Möglich ist aber auch der Einsatz von Kältemaschinen.

Das Kühlen mit Grundwasser ist zwar eine der besten Möglichkeiten zur Rückkühlung, ist aber in den seltensten Fällen gegeben. Alternativ dazu sind auch Erdsonden und Energiepfähle zur Rückkühlung gut geeignet. Die Rückkühlung durch kühle Nachtluft mit Trocken- oder Nasskühltürmen wird am häufigsten eingesetzt. Die Trocken- und Nasskühler werden auf dem Dach angebracht und sind der kühlen Nachtluft direkt ausgesetzt. [24]

Es gibt viele verschiedene Möglichkeiten um auf ein gutes Kühlergebnis zu kommen, darum muss man die beste Methode individuell für das jeweilige Gebäude bestimmen.

Die Investitionskosten für eine Bauteilaktivierung sind geringer als bei einer herkömmlichen Klimaanlage. Auch der Energiebedarf ist deutlich geringer, da für das Kühlen des Wassers natürliche Kältesenken in Frage kommen. Der einzige direkte Energieverbrauch entsteht dadurch, dass der Wasserkreislauf angetrieben werden muss.

Im Sommer können mit geringem Energieaufwand gute klimatische Bedingungen in den Räumen geschaffen werden. Das System der Bauteilaktivierung kann sowohl im Sommer, wie auch im Winter eingesetzt werden. Das System kann in der kalten Jahreszeit die Grundheizlast übernehmen. Teilweise können auch die angeschlossenen Anlagen zur Kälteerzeugung im Winter zur Wärmeerzeugung genutzt werden. Die Systeme, die die thermische Energie des Erdreiches nutzen können in gewissen Grenzen auch zur Wärmegewinnung beitragen.

Kälteerzeugung

Sollte die Wärmeversorgung dadurch nicht ausreichen, können andere Heizsysteme mit der Bauteilaktivierung kombiniert werden, z.B. Fußbodenheizung mit Fernwärme.

4 Fallbeispiele

4.1 Erdhäuser

Das Konzept der Erdhäuser ist es die Häuser ganz oder zum Teil unterirdisch zu Bauen bzw. mit einer Erdschicht zu bedecken.

Die Gebäudehülle besteht meist aus runden Formen und Kuppeln. Durch diese Gebäudestruktur entsteht die kleinstmögliche Hüllfläche im Verhältnis zur Grund- und Nutzfläche. Damit entsteht ein geringerer Wärmeaustausch über die Gebäudehülle als bei konventionellen Gebäuden.

Erdhäuser haben also ohne großen Aufwand nur aufgrund ihres Designs ein angenehmes Raumklima, das ganze Jahr über.

Die Erdschicht, die das Haus bedeckt, verhindert eine Aufwärmung der Außenhülle und somit auch die Erwärmung der Innenräume über die Hüllfläche. Die Fenster sollten so angelegt sein, dass auch hier der Wärmeeintrag gering bleibt.

Sollte der Kühleffekt durch die Bauweise alleine nicht hoch genug sein, ist es möglich z.B. die Bodenplatte mit dem Erdreich thermisch zu Verbinden um im Sommer die Wärme an das Erdreich abzugeben.

Aber natürlich haben Erdhäuser nicht nur im Sommer Vorteile, im Winter sorgt die kleine Hüllfläche dafür, dass weniger Wärmeenergie von Innen nach Außen übergeht. Die Erdschicht sorgt nicht nur für Schatten, sondern dient dem Gebäude auch als zusätzliche Dämmschicht. Zudem ist auch die thermische Kopplung der erdberührten Bauteile an das umgebene Erdreich zur Wärmegewinnung nutzbar. [21]



Bild 4-1 [21]

Das Sparen von Energie wird bei diesem Gebäude nicht in Frage gestellt. Die Energiebilanz, die sich hier ergibt ist sicherlich positiv zu bewerten.

Das Problem, das sich hier stellt, sind die Investitionskosten. Die Konstruktion von Erdhäusern ist sehr speziell und erfordert dadurch eine spezielle Bauausführung. Schon allein die Planung und Herstellung dieser Gebäude macht ein höheres Maß an Investitionskosten aus.

Da Erdhäuser meist eingeschossig gebaut sind, muss das Grundstück so ausgelegt sein, dass man die gewünscht Wohnfläche auf einer Ebene planen kann. Die Grundstücksgröße und damit der Grundstückspreis steigt.

4.2 Skythermhaus

In Kap. 2.3.4 ist das Thema Strahlungskühlung behandelt worden. Das bekannteste Beispiel dafür ist wohl das „Skythermsystem“ von Harold Hay. Dieses System ist 1973 an einem Wohnhaus in Atascadero (Kalifornien, USA) zum erstenmal zum Einsatz gekommen. Das mit drei Schlafzimmern und zwei Bädern ausgestattete Haus wurde international gelobt, da es über eine erschwingliche Solarheizung und eine innovative Kühlung verfügt. Das Kühlsystem besteht aus einer Reihe „Dachteich“- Wasserelementen und einer beweglichen Isolierverkleidung. Die Wasserelemente liegen auf dem Dach des Gebäudes und sind tagsüber durch die Isolierungsverkleidung geschützt. Nachts werden Wasserelemente freigelegt und können die Tagsüber aus dem Gebäude aufgenommene Wärme an den Nachthimmel abgeben. Beobachtungen und Messungen an Gebäuden, die mit dem Skytherm-System ausgestattet sind haben gezeigt, dass sie durchaus erfolgreich sind. [13], [32]



Bild 4-2 Skythermhaus, Atascadero 1973 [32]

4.3 Regenwasserzisterne zur Gebäudekühlung

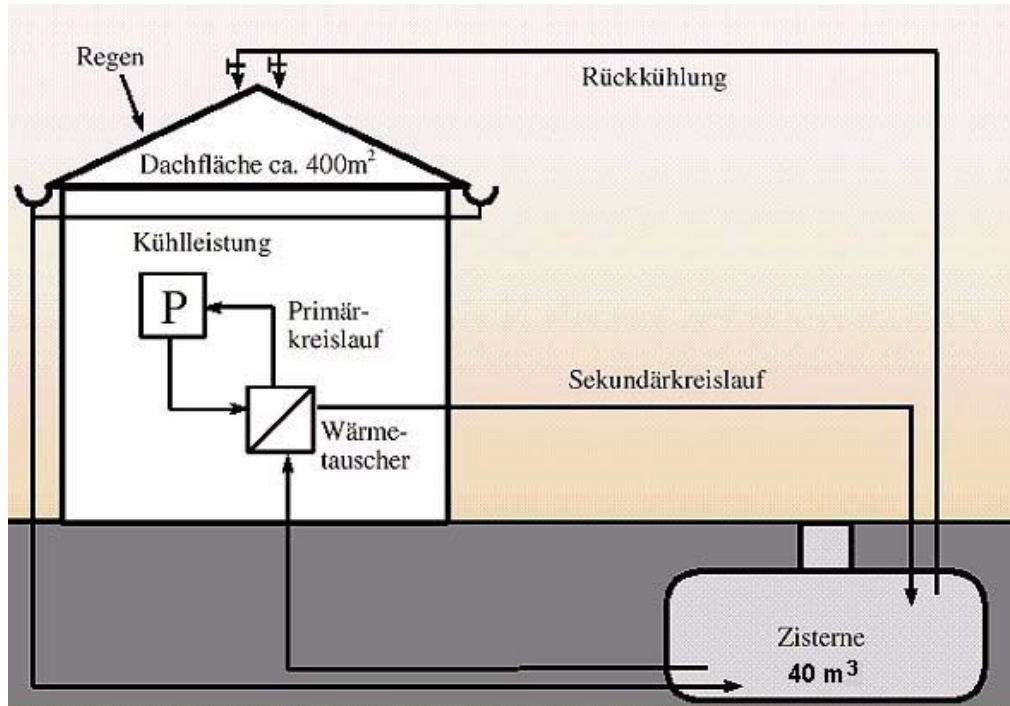


Bild 4-3 [1]

Das Projekt wurde von der deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert. Das Prinzip der Regenwasserzisterne zur Gebäudekühlung beruht auf der Strahlungskühlung.

In dem vorliegenden Fall wird das System zur Labor und Geräte­kühlung genutzt. Das gesammelte Wasser aus der Regenwasserzisterne wird über einen Wärmetauscher an das Primärsystem angeschlossen.

Tagsüber erwärmt sich der Speicherinhalt und wird nachts auf das Gebäudedach gepumpt, wo sich das Wasser über Strahlungsaustausch mit der Atmosphäre (Kap. 2.3.4) abkühlen kann. [1]

4.4 Meerwasserkühlung

Bei der Meerwasserkühlung kann das Meerwasser als unerschöpfliche Kältequelle herangezogen werden. In dem nachstehenden Beispiel wird gezeigt wie sich das Wasser zur Kühlung einsetzen lässt. Es entsteht ein ununterbrochener Zyklus der eine übliche Klimaanlage überflüssig macht und somit den Energiebedarf reduziert.

An der Küste von Halifax, Kanada wurde an Purdy's Wharf ein Klimatisierungsprojekt entwickelt, das kaltes Meerwasser vom Hafen gebraucht, um die nahegelegenen Gebäude zu kühlen.

Der Komplex der Purdy's Wharf umfasst, besteht aus drei Gebäuden plus einem Parkdeck.

Zwei der Gebäude sind mehrgeschossige Türme (18 Geschosse / 22 Geschosse). Diese beiden Türme sind mit der Meerwasserkühlung ausgestattet. [25]

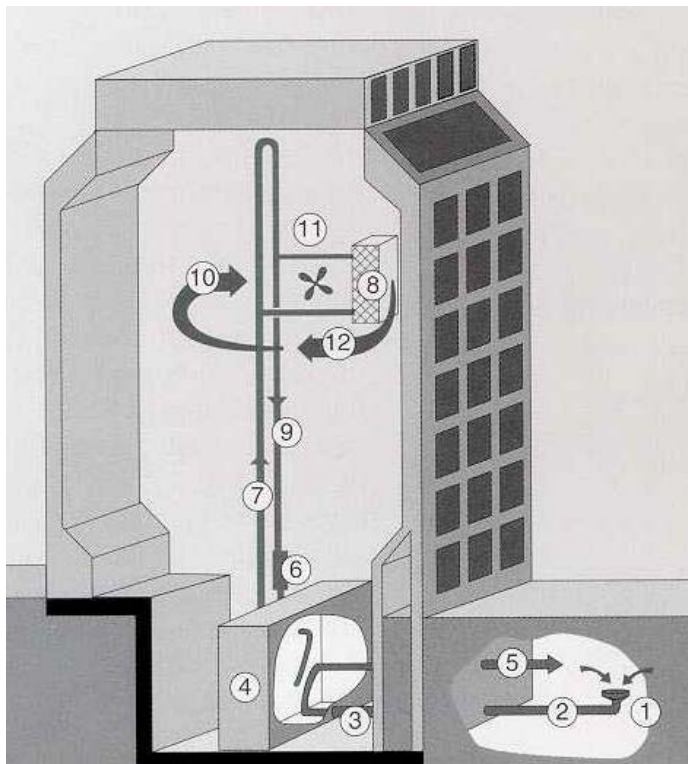


Bild 4-4 Konzept der Meerwasserkühlung [25]

Wie in Bild 4-4 gezeigt besteht in jedem Turm das Kühlsystem aus einem offenen Rohrleitungssystem, das zwei in Reihe geschaltete Wärmetauscher enthält. Zwei Zentrifugalpumpen (3) pumpen kaltes Meerwasser (2) durch den Einlass (1), der in einer Tiefe von 18 m liegt, leitet es durch die zwei Titanwärmetauscher (4) und leiten wärmeres Meerwasser zum Hafen zurück (5). Beide Wärmetauscher tauschen die Wärme vom geschlossenen Wasserkreislauf mit dem Meerwasser aus. Abgekühltes Wasser vom ersten Wärmetauscher geht direkt in die Kühlschlangen (8), die sich in jedem Stockwerk befinden. Eine Luftzirkulation (11) leitet die warme Luft (10) über die Rohrschlangen, die kühle Luft bereitstellen. Das aufgewärmte Wasser (9) wird zum Wärmetauscher zurückgeführt und von dort in den Hafen. [25]

5 Eigene Ansätze zur Gebäudekühlung

5.1 Flusswasserkühlung

Die billigste Methode zur Kühlung eines Kernkraftwerkes wäre die direkte Flusswasserkühlung. Da das erwärmte Wasser aus einem Kraftwerk hohe Temperaturen und ein hohes Volumen aufweist, ist diese Methode oft nicht möglich, denn das Flusswasser darf nicht zu stark aufgeheizt werden.

Bei einer normalen Gebäudekühlung könnte das System der Flusswasserkühlung aber funktionieren, da hier viel geringere Wärmelasten entstehen, als durch einen Reaktor.

Theoretisch ist es möglich das Flusswasser für verschiedene Kühlsysteme zu nutzen. Zum Beispiel könnte man das kalte Wasser direkt an eine thermische Bauteilaktivierung anschließen. Das kühle Wasser würde aus dem Fluss direkt in das Rohrsystem gepumpt werden. Um Verunreinigungen in den Rohren zu verhindern könnte man ein Filtersystem dazwischenschalten. Wenn man das Flusswasser nicht direkt mit dem Wasserkreislauf verbinden möchte könnte man evtl. auch Erdwärmesonden verwenden, die nicht die Erdreichtemperatur aufnehmen, sondern die Wassertemperatur. Damit könnte dann ein eigener Wasserkreislauf des Gebäudes gekühlt werden o.ä. (siehe Erdwärmesonden). Weiterhin wäre es möglich die Zuluft durch das Flusswasser zu kühlen.

Da es sich hierbei um ein fließendes Gewässer handelt ist die Erwärmung des Flusses im Sommer durch die Sonnenenergie äußerst gering und hat somit immer eine Kühlwirkung, ähnlich der Meerwasserkühlung in Halifax.

In gewissen Grenzen, kann man für diese Art der Kühlung auch Seen und Teiche einsetzen. Da es sich hier aber meist um stehende Gewässer handelt, ist die Gefahr einer zu hohen Erwärmung des Wassers gegeben. Diese Erwärmung hätte nicht nur Einfluss auf die Kühlleistung, sondern auch auf die Flora und Fauna in den entsprechenden Gewässern.

5.2 Regenwassernutzung

Bei der Regenwasserzisterne der ZAE wird das Regenwasser durch den Strahlungsaustausch mit der Atmosphäre abgekühlt.

Eine andere Idee wäre, wenn es die Möglichkeit gibt, dass die Regenwasserzisterne an einem gut beschatteten Platz eingebracht wird und dadurch nicht durch die Sonne erwärmt wird, neue Regenfälle würden ebenfalls dafür sorgen, dass das Wasser sich nicht zu stark erwärmt.

Man kann die Zisterne auch so in den Erdboden einbringen, so dass ähnlich den Energiepfählen oder Erdregistern die Erde das Wasser kühlt. Da allerdings die Wassermassen erheblich größer sind als bei den Rohrsystemen, könnte es wenigstens möglich sein die Temperatur des Regenwassers niedrig zu halten.

Die Nutzung des Wassers zur Gebäudekühlung könnte auch über die oben aufgeführten Systeme (z.B. Bauteilaktivierung) stattfinden.

6 Zentrum für Umweltbewusstes Bauen - ZUB



Bild 6-1 ZUB [35]

Das Zentrum für Umweltbewusstes Bauen ist ein Bürogebäude auf dem Gelände der Universität Kassel. Das ZUB hat in vielen Bereichen die Aufgabe Theorie und Praxis zu verbinden und dient somit als Forschungsobjekt. Das ZUB wird dem Anspruch eines Forschungs- und Demonstrationsgebäudes voll gerecht, da es nach dem neuesten Stand umweltgerechter Anlagentechnik geplant und gebaut wurde. Das Bürogebäude ist ein Niedrigst-Energiegebäude. Wärmetauschende Hüllflächen sind bei dem Anbau deutlich reduziert worden. Die großen Fensterflächen bestehen aus 3-Scheiben Wärmeverglasung mit geringen Rahmenflächenanteil, der hochwärmegedämmt ausgeführt wurde. Die Fensterfront ist nach Süden ausgerichtet und ermöglicht im Winter die Nutzung der Sonnenenergie. [16]

Diese hochwärmegedämmte Außenhülle, die vielfach bei modernen Bürogebäuden zu finden ist, spart viel Heizenergie ein. Das führt aber im Sommer zu einer hohen Kühllast (Kap. 6.1.1) im Gebäude, die nicht über die Außenhülle abgeführt werden kann. Im Falle des ZUB hat man sich für die Nutzung regenerativer Energie zur Gebäudekühlung entschieden, man nutzt die thermische Energie des Erdreiches (Kap.2.3.2).

Die Sohlplatte des ZUB ist mit einer Sohlplattenrückkühlung ausgestattet (Kap. 2.3.3.5). Die Sohle ist ohne unterseitige Dämmung auf den Untergrund

aufgebracht, so dass sie mit dem Erdreich in direktem thermischen Kontakt steht.

Die Kühlleistung ist bei diesem System nicht beliebig zu variieren, sondern hängt stark von den Erdreichtemperaturen ab.

Normalerweise liegt in 15 m Tiefe die Temperatur bei ca. 10°C. Je näher man der Erdoberfläche kommt, also auch näher an die Sohlplatte, desto wärmer wird das Erdreich.

Die thermische Simulationsrechnung hat gezeigt, dass bei diesen Untergrundverhältnissen das Kühlpotential schnell erschöpft wäre. Dem Erdreich wird während der Kühlperiode ständig Wärmezugeführt und hat keine Möglichkeit sich zu regenerieren. Das Bodengutachten hat aber ergeben, dass in einer Tiefe von 4,2 m – 7,7 m fließendes Grundwasser ansteht und der Baugrund darüber ist Schicht- und Sickerwasser führend. Das fließende Grundwasser hat den Vorteil, dass bereits ein Meter unter der Bodenplatte eine Temperatur von ca. 10°C herrscht. Zudem kann sich das Erdreich dadurch besser und schneller regenerieren. Die Kühlleistung kann somit über einen längeren Zeitraum genutzt werden. [10], [16]

Zur Kälteemission werden im ZUB thermisch aktivierte Decken (Kap. 3.1) genutzt. Bild 6-2 zeigt den Deckenaufbau des ZUB. Die im Estrich verlegten Rohre dienen im Standardbetrieb zum Heizen (Fußbodenheizung) und die Rohre im Beton sind zur Kühlung vorgesehen. Beide Kreisläufe sind getrennt regelbar.

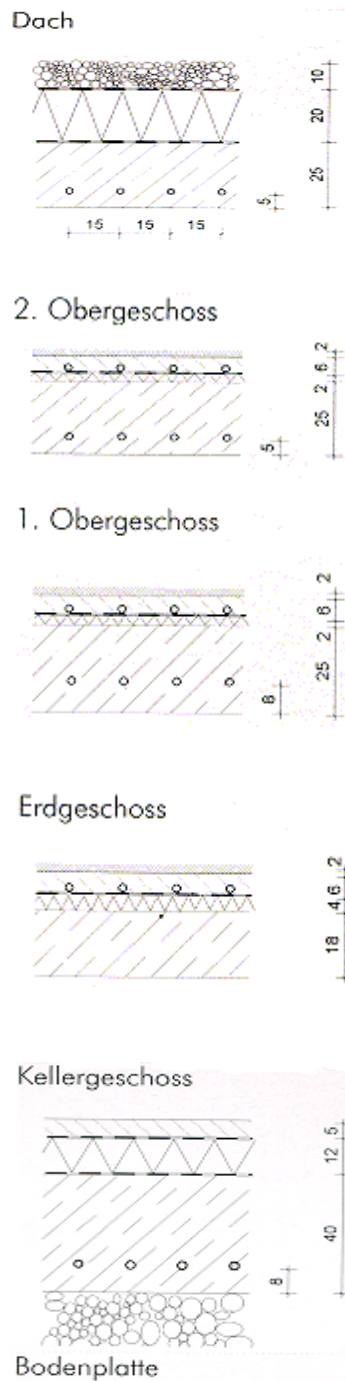


Bild 6-2 [23]

Zur Kühlung wird das Rohrsystem im Beton, also in den Decken mit kühlem Wasser durchströmt und kühlt somit die Raumlufttemperatur ab.

Die Rückkühlung dieses Wassers erfolgt in der Bodenplatte, die mit den thermisch aktivierten Decken verbunden ist.

Die Decken- und Estrichsysteme können zwar einzeln geregelt werden, können aber auch gleichzeitig betrieben werden. Es ist möglich auch die Rohre im Estrich mit kühlem Wasser zu durchströmen und so die Kühlleistung zu erhöhen.

Um die Kühlung durch das Wasser zu unterstützen, kann den Betonspeichermassen über einen erhöhten Luftwechsel während der Nacht zusätzlich Wärmeenergie entzogen werden.

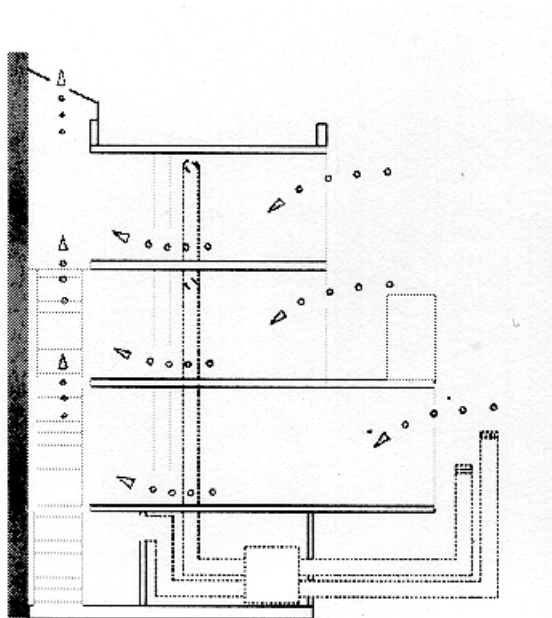


Bild 6-3 Luftführung während der nächtlichen Auskühlung im Sommer [16]

Auch die Innenwände können als „Kältespeicher“ dienen, da sie nicht in Leichtbauweise errichtet wurden. Die Büros werden untereinander von Kalksandsteinwänden getrennt und der Flur wird von den Büros durch eine Wand von ungebrannten Lehmsteinen getrennt.

Besonders die Lehmwand hat eine hohe Speichermasse und ist auch im Winter zur Aufnahme der solaren Energie sehr wertvoll.

Ansonsten dient das Lüftungskonzept der Frischluftzufuhr und ist unabhängig von der Kühlung geregelt. [16]

Da die Kühlleistung über die Sohlplatte begrenzt ist, ist es wichtig, dass die Kühllasten in den Räumen nicht zu hoch werden.

Um den Wärmeeintrag durch die Sonnenstrahlung zu verringern, sind die Fenster des ZUB mit einem außenliegenden Sonnenschutz versehen. Es sind hinterlüftete und drehbare, 80 mm breite Lamellenjalousien.

In den Kap. 6.1 und 6.2 ist versucht worden die Leistungsfähigkeit der Sohlplattenrückkühlung mit verschiedenen Rechnungen aufzuzeigen. Als erstes wird mit der Kühllastberechnung gezeigt welche möglichen Kühllasten im Gebäude auftreten können. Dazu wurde ein bestimmter Raum ausgewählt. Dieser Raum ist ein Büroraum im 2. Obergeschoss, der die benötigten Parameter für die Rechnung liefert.

Des Weiteren wird mit einer überschlägigen Rechnung gezeigt welche mögliche Kühlleistung die Sohlplatte erbringt.

Zusätzlich soll der Temperaturverlauf in und um die Sohlplatte herum durch ein Computerprogramm aufgezeigt werden. GF2DIM von Gullfiber ist ein Programm, das der Wärmebrückenberechnung dient, aber auch zur Bestimmung von Wärmestromdichten im Bauteil und im Raum genutzt werden kann.

6.1 Kühllast eines Büroraumes

6.1.1 Definitionen

Als Kühllast bezeichnet man die kalorische Leistung, die zu einem bestimmten Zeitpunkt über die Raumlufttemperatur dem Raum abgeführt werden muss, um vorgegebene Luftzustände (z.B. eine konstante Raumlufttemperatur) einzuhalten. [19]

Die Kühllast beschreibt die Energie, die zur Aufrechterhaltung eines gewünschten Raumklimas mit Hilfe von Kühlsystemen abgeführt werden muss. Diese Energie ist in vorherigen Kapiteln oft mit Wärmelast bezeichnet worden.

Die Kühllast setzt sich zusammen aus einer inneren und einer äußeren Kühllast. Die innere Kühllast setzt sich auch wiederum aus verschiedenen Komponenten zusammen, dies sind verschiedene Wärmequellen, die Einfluss auf die Raumtemperatur haben, die Wärmeabgabe der Personen, die Wärmeabgabe der Beleuchtung, Maschinen und Geräte und die Wärmeabgabe über Innenflächen aus Nachbarräumen.

Die äußere Kühllast entsteht durch äußere Einflüsse, d.h. aus Wärmeenergie (z.B. Sonneneinstrahlung) die durch die Gebäudeumschließungsflächen ins Innere gelangt.

Die VDI 2078 sieht für die Berechnung der Kühllast zwei Methoden vor. Zum einen ist es Möglich sie mit einem Kurzverfahren zu berechnen und zum anderen mit einem EDV-Verfahren.

Für die Kühllastberechnung für das ZUB wurde das Kurzverfahren gewählt. Formeln und Werte sind in der VDI 2078 in Kap.6 zu finden.

6.1.2 Kühllastberechnung nach VDI 2078 für das ZUB

Die Kühllastrechnung wurde nicht für das gesamte Gebäude erstellt. Als Anschauungsobjekt wurde ein Büroraum im zweiten Obergeschoss gewählt. Nachstehend sind die wichtigsten Daten aufgeführt, die für die Berechnung gebraucht werden.

Die Daten zum Volumen und zu der Beleuchtung des Raumes sind der Diplomarbeit von Katrin Schlegel [16] entnommen, die Kühllastzonen sind in der VDI 2078 zu finden.

| | | |
|---------------------------------------|---------------------------|-----------------|
| Bauprojekt: | Bürogebäude | |
| Raumbezeichnung: | Büro (R 2.06) | Kühllastzone: 3 |
| Raumlufttemperatur ϑ_{LR} : | 26°C | |
| Raumfläche: | 24,39 m ² | |
| Raumvolumen: | 90 m ³ | |
| Personenbelegung: | 2 | |
| Maschinen: | 2 Computer mit Bildschirm | |
| Beleuchtung: | Lampenart: | Leuchtstoff |
| | Anzahl: | 4 |

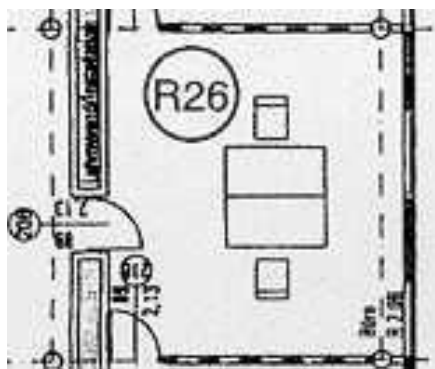


Bild 6-4 Grundriss Büroraum [10]

Innere Kühllast Q_I :

$$Q_I = Q_P + Q_B + Q_M + Q_G + Q_C + Q_R$$

| | |
|-------|--|
| Q_P | Kühllast durch Personen |
| Q_B | Kühllast durch Beleuchtung |
| Q_M | Kühllast durch Maschinen und Geräte |
| Q_G | Kühllast durch Stoffdurchsatz |
| Q_C | Sonstige Wärmez- und abfuhr |
| Q_R | Kühllast infolge unterschiedlicher Nachbarräumtemperaturen |

Für das Büro im ZUB gilt:

$$Q_I = Q_P + Q_B + Q_M$$

Kühllast durch Personen

$$Q_P = n \cdot q_P \cdot S_i$$

| | |
|-------|--------------------------------------|
| N | Anzahl der Personen |
| q_P | Wärmeabgabe des menschlichen Körpers |
| S_i | Kühllastfaktor für innere Lasten |

$$Q_P = 2 \text{ Pers} \cdot 70 \text{ W} / \text{Pers} \cdot 0.81 = \underline{\underline{113,4 \text{ W}}}$$

Kühllast durch Beleuchtung

$$Q_B = P \cdot l \cdot \mu_B \cdot S_i$$

| | |
|---------|--|
| P | gesamte Anschlussleistung der Leuchten |
| l | Gleichzeitigkeitsfaktor |
| μ_B | Raumbelastungsgrad |
| S_i | Kühllastfaktor |

$$Q_B = 280 \text{ W} \cdot 0.3 \cdot 1 \cdot 0.62 = \underline{\underline{52 \text{ W}}}$$

Kühllast durch Maschinen und Geräte (2 Computer + 1 Drucker)

$$Q_M = I \cdot S_i \cdot \sum P_j$$

| | |
|----------------|---------------------------------|
| I | Gleichzeitigkeitsfaktor |
| S _i | Kühllastfaktor |
| P _j | Nennleistung der j-ten Maschine |

$$Q_M = 1 \cdot 0,62 \cdot 400 \text{ W} = \underline{\underline{248 \text{ W}}} \quad (2 \text{ Computer})$$

$$Q_M = 0,125 \cdot 0,62 \cdot 50 \text{ W} = \underline{\underline{3,875 \text{ W}}} \quad (1 \text{ Drucker})$$

$$Q_I = 113,4 + 52 + 248 + 3,875 = \underline{\underline{417,275 \text{ W}}}$$

Die Zahlenwerte, die oben nicht aufgeführt sind, sind Rechenwerte, die im Anhang der VDI 2078 zu finden sind.

Äußere Kühllast Q_A :

$$Q_A = Q_W + Q_T + Q_S + Q_{FL}$$

| | |
|----------|---|
| Q_W | Kühllast durch Außenwände und Dächer |
| Q_T | Kühllast infolge Transmission durch Fenster |
| Q_S | Kühllast infolge Strahlung durch Fenster |
| Q_{FL} | Kühllast durch Infiltration |

Kühllast durch Außenwände und Dächer

$$Q_W = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_{\text{äq}}$$

| | |
|-------------------------------|---------------------------------|
| k | Wärmedurchgangskoeffizient |
| A | Fläche |
| $\Delta\vartheta_{\text{äq}}$ | äquivalente Temperaturdifferenz |

Der Raum 2.05 im ZUB hat als Außenwand eine Fensterfläche, so dass für die Berechnung die Dachfläche entscheidend ist.

$$Q_W = 0,16 \text{ W / m}^2\text{K} \cdot 25 \text{ m}^2 \cdot 9,3 \text{ K} = \underline{\underline{37,2 \text{ W}}}$$

Kühllast infolge Transmission durch Fenster

$$Q_T = k_F \cdot A_M \cdot (\vartheta_{La} - \vartheta_{LR})$$

| | |
|------------------|--|
| k_F | Wärmedurchgangskoeffizient des Fensters |
| A_M | gesamte Fensterfläche (Maueröffnungsmaß) |
| ϑ_{La} | momentane Außenlufttemperatur |
| ϑ_{LR} | Raumlufttemperatur |

$$Q_T = 0,8 \text{ W / m}^2\text{K} \cdot 15,8 \text{ m}^2 \cdot 9 \text{ K} = \underline{\underline{113,8 \text{ W}}}$$

Kühllast infolge Strahlung durch Fenster

$$Q_S = [A_1 \cdot I_{\max} + (A - A_1) \cdot I_{\text{diff,max}}] \cdot b \cdot S_a$$

| | |
|-----------------------|---|
| A_1 | besonnte Glasfläche |
| A | gesamte Glasfläche |
| I_{\max} | Maximalwert der Gesamtstrahlung für den Auslegungsmonat |
| $I_{\text{diff,max}}$ | Maximalwert für Diffusstrahlung für den Auslegungsmonat |
| b | Durchlassfaktor der Fenster und Sonnenschutzeinrichtungen |
| S_a | Kühllastfaktor für äußere Strahlungslasten |

$$Q_S = [11,7 \cdot 385 + (11,7 - 11,7) \cdot 354] \cdot 0,135 \cdot 0,59 = \underline{\underline{358,8 W}}$$

$$Q_A = 37,2 W + 113,8 W + 358,8 = \underline{\underline{509,8 W}}$$

Die gesamte Kühllast für den Raum 2.05 setzt sich aus Q_I und Q_A zusammen und ergibt sich zu:

$$417,275 + 509,8 = \underline{\underline{927,1 W}}$$

6.2 Kühlleistung der Sohlplatte

6.2.1 Überschlägige Rechnung nach VDI 4640

In der VDI 4640 Blatt 2 wird in Kap. 4 die „Nutzung des oberflächennahen Untergrundes mit Erdwärmekollektoren“ behandelt.

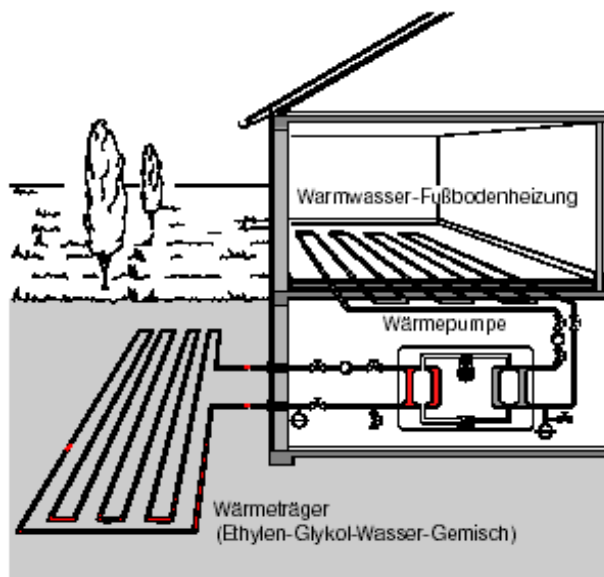


Bild 6-5 Schema eines Erdwärmekollektors [14]

Der Erdwärmekollektor (Bild 6-5) ist ein vertikal ausgerichtetes Flächensystem zur thermischen Nutzung des Untergrundes.

Die Sohlplatte des ZUB ist ebenfalls ein vertikales Flächensystem, das dem Untergrund Energie entzieht.

Die VDI 4640 ist nicht für die Berechnung der Kühlleistung ausgelegt, sie dient lediglich als Grundlage für die getroffenen Annahmen in der folgenden Rechnung.

| Untergrund | Spezifische Entzugsleistung | | bei 1200 h |
|--------------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|
| | bei 1800 h | bei 2400 h | |
| Trockener, nichtbindiger Boden | 10 W/m ² | 8 W/m ² | 12 W/m ² |
| Bindiger Boden, feucht | 20-30 W/m ² | 16-24 W/m ² | 24-36 W/m ² |
| Wassergesättigter Kies/Sand | 40 W/m ² | 32 W/m ² | 48 W/m ² |

Tabelle 6-1 [20]

Die spezifischen Entzugsleistungen für 1200 h Jahresbetriebsstunden sind aus den Zahlen für 1800 h und 2400 h abgeschätzt worden.

Auf Grundlage dieser Tabelle sind folgende Rechnungen zur Leistungsfähigkeit des Sohlplattenrückkühlers erstellt worden:

Annahmen:

- Jahresbetriebsstunden: 1200 (6 Monate à 20 Tage á 10 h)
- Spezifische Entzugsleistung: 36 W/m² (siehe Tabelle)

Da diese Rechnung nur auf die Kühlleistung bezogen ist, wurde von einem halben Jahr Betriebsdauer ausgegangen.

Die Bodenplatte hat eine Größe von 396 m², dies ist die Wirkungsfläche der Rohrschlangen im Beton.

$$36 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot 396 \text{ m}^2 = \underline{\underline{14256 \text{ W}}}$$

Der Wert von 14256 W entspricht der Kühlleistung für das gesamte Gebäude. Das Gebäude hat eine zu kühlende Nutzfläche (ohne Keller) von 1510 m². Eine Kühlleistung auf den Quadratmeter bezogen ergibt sich aus:

$$14256 \text{ W} \div 1510 \text{ m}^2 = \underline{\underline{9,44 \text{ W}}}$$

Dieses Ergebnis von 9,44 W/m² würde für den Raum 2.05 (24,39 m²) eine Kühlleistung von 230 W ergeben.

6.2.2 Wärmeübergang zwischen Bodenplatte und Erdreich nach GF2DIM

Dieses Computerprogramm GF2DIM von Gullfiber ist ein Programm zur Wärmebrückenberechnung. Die zweidimensionale Berechnung nach der finiten Differenzen-Methode zeigt die Wärmestromdichten im Bauteil auf.

Für die Berechnung sind folgende Eingangsparameter erforderlich:

- Bauteilschichten
- Raumtemperatur
- Wärmeleitwiderstände
- Wärmeübergangskoeffizienten
- Temperatur des Mediums im Bauteil

Exakte Ergebnisse zu erzielen ist schwierig, da die erforderlichen Eingangsparameter wiederum von anderen Parametern abhängig sind.

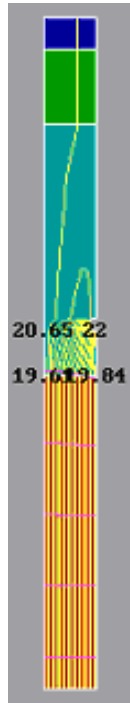


Bild 6-6 zeigt den Temperaturverlauf in der Bodenplatte und dem Erdreich darunter. Folgende Annahmen wurden getroffen:

- Raumtemperatur: 22°C
- Rohrtemperatur: 22°C
- Bodentemperatur (0,5 m Tiefe): 10°C

Der berechnete Ausschnitt hat eine Breite von 0,085 m (b) und eine Länge von 1,07 m (einschließlich 0,5 m Erdboden).

Bild 6-7 zeigt die Temperaturen die auf einer Linie mit der unteren Rohrkante liegen (blaue Linie) und die Temperaturen, die an verschiedenen Punkten an der Unterkante der Bodenplatte zu finden sind (rote Linie).

Es ist zu Erkennen, dass der Temperaturunterschied direkt unter dem Rohr am größten ist. Je größer der Abstand zum Rohr wird, desto geringer wird die Differenz.

Bild 6-6 Die Wärmestromdicht

$$q = \frac{\lambda}{s} \cdot \Delta T$$

wird mit der Wärmeleitfähigkeit (λ) des Materials, der Bauteildicke (s) und der Temperaturdifferenz (ΔT) berechnet.

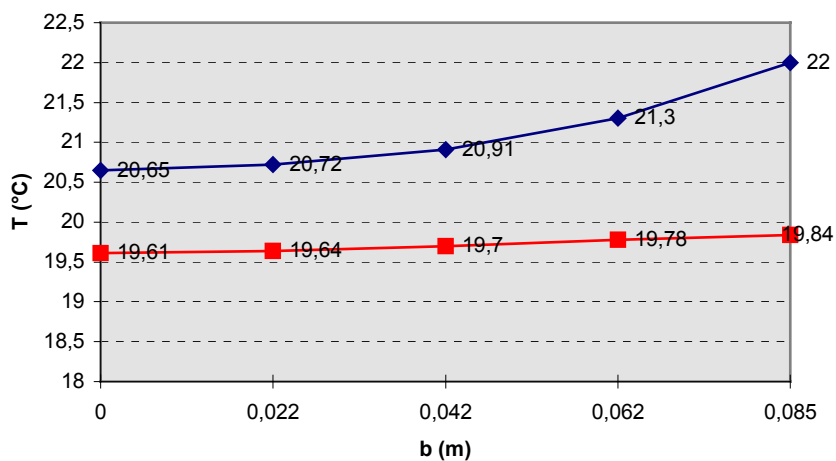


Bild 6-7: Temperaturkurven der Rohrebene und der Bauteilunterkante

Aus den fünf Temperaturdifferenzen, die man aus Bild 6-7 errechnen kann erhält man mit $\lambda = 2,1 \text{ W/(m K)}$ und $s = 0,074 \text{ m}$ folgende Werte für die Wärmestromdichte:

$$q_0 = 29,54 \text{ W/m}^2$$

$$q_{0,022} = 30,60 \text{ W/m}^2$$

$$q_{0,042} = 34,36 \text{ W/m}^2$$

$$q_{0,062} = 43,17 \text{ W/m}^2$$

$$q_{0,085} = 61,34 \text{ W/m}^2$$

Der daraus gebildete, lineare Mittelwert ergibt: $q_{\varnothing} = 39,8 \text{ W/m}^2$

Bei 396 m^2 Bodenplatte erhält man eine Kühlleistung von:

$$39,8 \text{ W/m}^2 \cdot 396 \text{ m}^2 = 15760,8 \text{ W}$$

Bezogen auf die zu kühlende Nutzfläche:

$$15760,8 \text{ W} \div 1510 \text{ m}^2 = 10,44 \text{ W/m}^2$$

$10,44 \text{ W/m}^2$ ergeben in dem Büroraum ($24,39 \text{ m}^2$) eine Kühlleistung von $254,6 \text{ W}$.

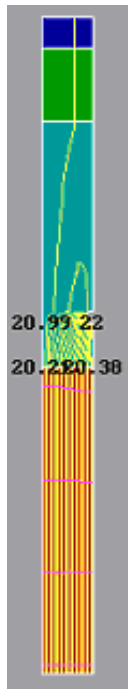


Bild 6-8 zeigt den gleichen Ausschnitt der Bodenplatte mit einer anderen Annahme:

Raum- und Rohrtemperatur sind mit 22°C gleich geblieben. Geändert hat sich die Temperatur, die im Erdboden herrscht. Hier sind in 0,5 m Tiefe 13°C vorausgesetzt worden.

Wie Bild 6-7 zeigt auch Bild 6-9 die Temperaturdifferenzen zwischen der Unterkante der Bodenplatte und der Ebene auf der sich das Rohr befindet.

Auch hier wird deutlich, dass der Temperaturunterschied unter dem Rohr am höchsten ist und mit zunehmender Entfernung zum Rohr kleiner wird.

Bild 6-8

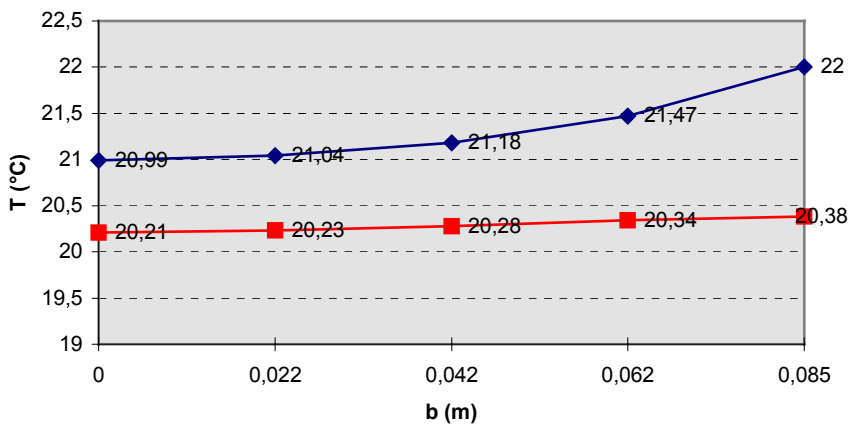


Bild 6-9: Temperaturkurven der Rohrebene und der Bauteilunterkante

Die Wärmestromdichten nach Bild 6-8 sind:

$$\begin{aligned}q_0 &= 22,15 \text{ W/m}^2 \\q_{0,022} &= 23,00 \text{ W/m}^2 \\q_{0,042} &= 25,56 \text{ W/m}^2 \\q_{0,062} &= 32,10 \text{ W/m}^2 \\q_{0,085} &= 46,00 \text{ W/m}^2\end{aligned}$$

Hier erhält man einen linearen Mittelwert von $q_{\varnothing} = 29,76 \text{ W/m}^2$.

$$29,76 \text{ W/m}^2 \cdot 396 \text{ m}^2 = 11784,96 \text{ W}$$

Bezogen auf die zu kühlende Nutzfläche ist die Kühlleistung:

$$11784,96 \text{ W} \div 1510 \text{ m}^2 = 7,8 \text{ W/m}^2$$

Die Kühlleistung für den Büroraum wäre demnach: 190,24 W

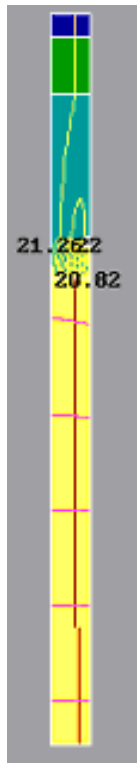


Bild 6-10 zeigt den Wärmestrom durch die Bodenplatte mit 1 m Erdreich darunter.

Raum und Rohrtemperatur betragen wieder 22°C und die Erdreich Temperatur ist ebenfalls wieder mit 10°C angenommen. Diese liegt jetzt aber in 1 m Tiefe.

Auf Grundlage dieser Annahmen kommen folgende Wärmestromdichten zustande:

- $q_0 = 16,47 \text{ W/m}^2$
- $q_{0,020} = 17,04 \text{ W/m}^2$
- $q_{0,042} = 19,03 \text{ W/m}^2$
- $q_{0,062} = 23,57 \text{ W/m}^2$
- $q_{0,085} = 33,51 \text{ W/m}^2$

Der lineare Mittelwert daraus beträgt: $q_{\varnothing} = 21,92 \text{ W/m}^2$.

Aus diesem Mittelwert erhält man für den Büroraum eine Kühlleistung von 140,24 W (Rechnung: siehe oben).

Bild 6-10

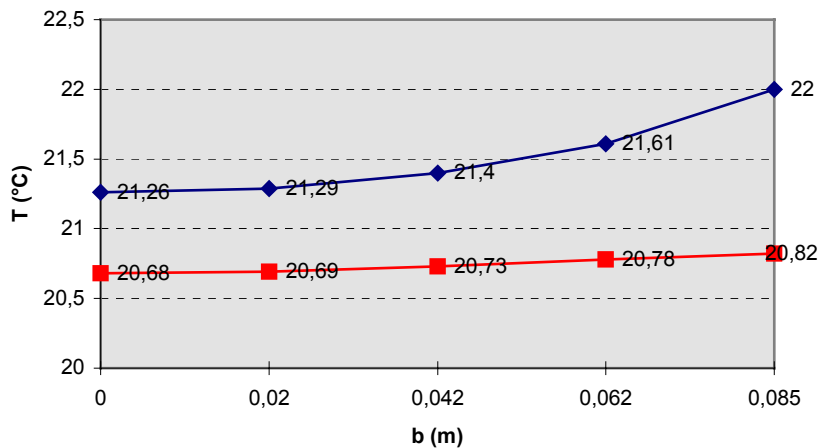
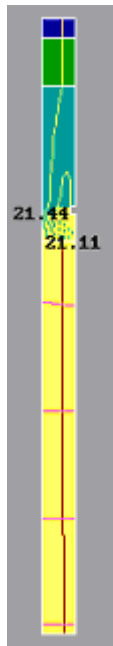


Bild 6-11 Temperaturkurven der Rohrebene und der Bauteilunterkante



Wie Bild 6-10 zeigt auch Bild 6-12 den Wärmestrom durch die Bodenplatte mit einem Meter Erdreich darunter. Hierbei wurde eine Erdreichtemperatur von 13°C angesetzt. Die anderen Temperaturen betragen weiterhin 22°C.

Das führt zu folgenden Wärmestromdichten:

- $q_0 = 12,21 \text{ W/m}^2$
- $q_{0,020} = 12,78 \text{ W/m}^2$
- $q_{0,042} = 14,20 \text{ W/m}^2$
- $q_{0,062} = 17,61 \text{ W/m}^2$
- $q_{0,085} = 25,28 \text{ W/m}^2$

mit folgendem linearem Mittelwert: $q_{\varnothing} = 16,42 \text{ W/m}^2$.

Die daraus für den Büroraum resultierende Kühlleistung beträgt: 105,12 W

Bild 6-12

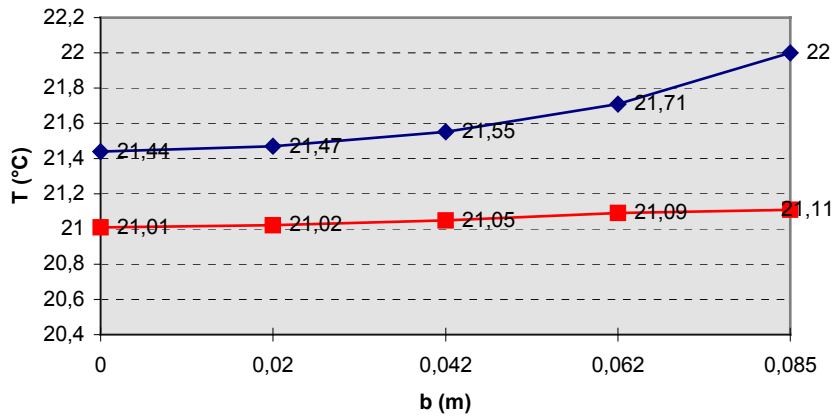


Bild 6-13 Temperaturkurven der Rohrebene und der Bauteilunterkante

6.3 Energieverbrauch

Der elektrische Energieverbrauch des ZUB zum Heizen und Kühlen beläuft sich auf 9% des gesamten Strombedarfs.

Dieser beträgt theoretisch 37,2 MWh/a. [16]

Bezogen auf die zu kühlende Fläche (1510 m²), die auch für die übrigen Rechnungen angesetzt wurden, ergeben sich 25,0 kWh/m²a.

$$9\% \text{ von } 25,0 \text{ kWh/m}^2\text{a} = 2,25 \text{ kWh/m}^2\text{a}$$

Unter der Annahme, dass 50% dieses Energiebedarfs für die Kühlung verwendet werden ergeben sich dann 1,125 kWh/m²a.

$$1,125 \div 1200 \frac{h}{a} = 0,0009375 \text{ kW} / \text{m}^2$$

$$0,0009375 \cdot 1510 \text{ m}^2 = \underline{\underline{1,42 \text{ kW}}}$$

Die errechnete Kühlleistung beläuft sich auf ca. 14,3 kW (Kap. 6.2.1), d.h. Man kann nach dieser Rechnung von 0,1 kW Energiebedarf je kW Kälteleistung ausgehen.

Bei konventionellen Klimaanlage dagegen kann man von 0,25 – 0,3 kW Energiebedarf je kW Kälteleistung ausgehen. [9]

Bei diesen Berechnungen ist deutlich geworden, dass der Energiebedarf für die Kühlung über die Sohlplatte deutlich niedriger ist als bei einer Klimaanlage.

6.4 Alternative zur Sohlplatte

Die VDI 4640 Blatt 2 beschreibt unter anderem die Entzugsleistung für Erdwärmesonden. Die nachstehenden Zahlen und Ergebnisse sollen zeigen wie viel Kühlleistung mit einer Erdwärmesondenanlage für das ZUB erzielt werden könnte. Die Rechnungen sind überschlägig und unter Verwendung verschiedener Annahmen entstanden.

Annahmen sind für die Anzahl und die Länge der Sonden getroffen worden. Ebenfalls Annahmen sind die Betriebsstunden, die aber auch so für die Sohlplatte abgeschätzt wurden.

| Untergrund | spezifische Entzugsleistung | |
|--|-----------------------------|------------|
| | für 1800 h | für 2400 h |
| Allgemeine Richtwerte: | | |
| Schlechter Untergrund (trockenes Sediment) ($\lambda < 1,5 \text{ W/(mK)}$) | 25 W/m | 20 W/m |
| Normaler Festgesteins-Untergrund und wassergesättigtes Sediment ($\lambda = 1,5 - 3,0 \text{ W/(mK)}$) | 60 W/m | 50 W/m |
| Festgestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit ($\lambda > 3,0 \text{ W/(mK)}$) | 84 W/m | 70 W/m |
| Einzelne Gesteine: | | |
| Kies, Sand, trocken | <25 W/m | <20 W/m |
| Kies, Sand, wasserführend | 65-80 W/m | 55-65 W/m |
| Bei starkem Grundwasserfluss in Kies und Sand, für Einzelanlagen | 80-100 W/m | 80-100 W/m |
| Ton, Lehm, feucht | 35-50 W/m | 30-40 W/m |
| Kalkstein (massiv) | 55-70 W/m | 45-60 W/m |
| Sandstein | 65-80 W/m | 55-65 W/m |
| Saure Magmatite (z.B. Granit) | 65-85 W/m | 55-70 W/m |
| Basische Magmatite (z.B. Basalt) | 40-65 W/m | 35-55 W/m |
| Gneis | 70-85 W/m | 60-70 W/m |
| Die Werte können durch die Gesteinsausbildung wie Klüftung, Schieferung, Verwitterung erheblich schwanken. | | |

Tabelle 6-2 [21]

Anhand der Tabelle 6-2 könnte man für das ZUB eine spezifische Entzugsleistung von ca. 60 W/m abschätzen.

Diese Entzugsleistung käme bei bindigem Boden oder feuchtem Kies/ Sand bei 1200 Betriebsstunden zustande.

Bei einer Grundfläche von 396 m² könnten ca. 10 Erdwärmesonden (50 – 100 m lang) in einem Abstand von ungefähr 6 m zwischen den einzelnen Sonden unter dem ZUB installiert werden.

Geht man weiterhin von einer durchschnittlichen Länge von 75 m je Erdwärmesonde aus, würde sich für das ZUB eine Entzugsleistung von $75 \text{ m} \cdot 60 \text{ W/m} = 45000 \text{ W}$ ergeben.

Wie oben erwähnt hat das Gebäude eine zu kühlende Nutzfläche von 1510 m².

$$45000 \text{ W} \div 1510 \text{ m}^2 = \underline{29,8 \text{ W/m}^2}$$

Auf den Büroraum 2.05 mit 24,39 m² bezogen, würde eine Kühlleistung von $29,8 \text{ W/m}^2 \cdot 24,39 \text{ m}^2 = \underline{726,8 \text{ W}}$ entstehen.

Unter den in beiden Rechnungen getroffenen Voraussetzungen, hat die Anlage mit den Erdwärmesonden ein deutlich besseres Ergebnis erzielt als das horizontale Flächensystem.

Diese bessere Kühlleistung ist aber nur mit höheren Investitionskosten und auch höheren Energiekosten zu erreichen.

Die Kosten für die Ausstattung der Bodenplatte mit Rohrschlangen sind deutlich geringer als der Bau der Erdwärmesonden-Anlage. Zehn Erdwärmesonde, die 75 m in die Erde reichen bedürfen aufwendiger Bohrungen und haben hohe Materialkosten.

6.5 Ergebnisdiskussion

Die Berechnungen der Kühlleistungen der Bodenplatte (Kap. 6.2.1 und Kap. 6.2.2) haben eines deutlich gemacht, die Kühllast, die im Gebäude bzw. in dem Beispiel-Bürraum auftritt übersteigt die Kühlleistung der Bodenplatte deutlich.

Die Abbildungen 6-6 bis 6-13 zeigen anhand der Wärmeströme, dass sich schon geringe Temperaturänderungen im Erdreich auf die Kühlleistung auswirken. Die Berechnungen fanden jeweils mit 0,5 m und 1 m Bodentiefe und mit 10°C und 13°C statt. Dieser Temperaturunterschied von 3°C hat in 0,5m Tiefe einen Leistungsunterschied von ca. 10 W/m² erbracht.

Bezogen auf die Bodenplatte entspricht das etwa 4000 W Unterschied in der Kühlleistung des Gebäudes. Bei 1 m Tiefe entsteht durch die Temperaturdifferenz von 3°C ein Leistungsunterschied von ca. 5,5 W/m², was einen Unterschied in der Kühlleistung für das Gebäude von über 2000 W ausmacht.

Diese Berechnungen machen deutlich welchen Einfluss die Temperaturen und Temperaturunterschiede im Erdreich auf die Kühlleistung haben.

Die Rechnungen in beiden Kapiteln (6.2.1, 6.2.2) basieren oft auf Annahmen. Eine Annahme, die in die Berechnungen mit einfließt, ist die, dass die Kühlenergie der Bodenplatte gleichmäßig und gleichzeitig im gesamten Gebäude verteilt wird. Die zu kühlende Nutzfläche beinhaltet Bereiche und Räume, die evtl. nicht im gleichen Maß gekühlt werden müssen wie der Bürraum. Das Foyer und das Treppenhaus könnten durchaus ungekühlt bleiben, was allerdings bedeutet, dass ein zu großer Luftwechsel über offene Bürotüren vermieden werden sollte, um weitere Wärmeeinträge in die Büros zu verhindern. Der Veranstaltungssaal könnte mit einer gewissen Vorlaufzeit nur zu den entsprechenden Veranstaltungen gekühlt werden.

Auf der anderen Seite gibt es im ZUB auch einen Experimentalbereich, der wahrscheinlich eine höhere Kühlleistung beansprucht.

Unterstützend wirkt die Nachtauskühlung, wie in Kapitel 6 beschrieben, da sich die Betonspeichermassen zusätzlich durch die kühle Nachtluft abkühlen.

Es wird deutlich, dass man bei einer begrenzten Kühlleistung für das Gebäude, die Verteilung gut regeln muss, um für alle ein gutes Raumklima zu schaffen. Die begrenzte Kühlleistung unterstützt den sorgsamen Umgang mit der Kühlenergie, d.h. ein gut geplanter Regelkreislauf verhindert die Verschwendung von Energie. Zur Zeit (Juli 2002) werden Messungen im Zentrum für Umweltbewusstes Bauen durchgeführt, die die Kühlleistung der Bodenplatte darlegen sollen.

Kap. 6.3 zeigt den Energieverbrauch zum Kühlen durch die Bodenplatte im Vergleich mit dem Energieverbrauch einer konventionellen Klimaanlage. Die Rechnung hat gezeigt, dass mit der Sohlplatte nur ein Drittel der Energie verbraucht wird, die für eine Klimaanlage notwendig wäre für die gleiche Kühlleistung. Die Kühlung über die Bodenplatte ist hinsichtlich des Energieverbrauches positiv zu bewerten.

Kapitel 6.4 zeigt eine Berechnung unter der Annahme, dass das ZUB mit Erdsonden als Rückkühlsystem ausgestattet ist. Die Kühlleistung der Erdsonden ist höher als die der Sohlplatte. Die Investitionskosten dürften (wie in Kap.6.4 bereits erwähnt) deutlich höher liegen als die der Sohlplatte. Das Beispiel zeigt, dass Alternativen zu der Sohlplatte durchaus vorhanden sind, ob und in wie weit diese Alternativen in Bezug auf das Zentrum für umweltbewusstes Bauen durchführbar waren ist nicht Bestandteil dieser Arbeit gewesen.

7 Schlusswort

Ziel der vorliegenden Arbeit war es am Beispiel des Zentrums für umweltbewusstes Bauen die Leistungsfähigkeit seines Kühlsystems darzulegen. Des weiteren sollten Formen passiver und hybrider Kühlsysteme zusammengetragen und bewertet werden.

Ich habe in dieser Diplomarbeit eine Vielzahl von passiven und hybriden Kühlsystemen vorgestellt, die ein angenehmes Raumklima auch an heißen Sommertagen schaffen können. Je nach zu kühlendem Objekt, Ort und sonstiger Randbedingungen sind die einzelnen Systeme auszuwählen und zu kombinieren.

Eine pauschale Aussage, welches System das Beste ist kann nicht getroffen werden, da dies von zu vielen äußeren Bedingungen abhängig ist. D.h. das ein passives und hybrides Kühlsystem für jedes Projekt individuell berechnet, geprüft und angepasst werden muss. Die individuelle Anpassung und die nicht immer sichergestellte Kühlleistung, sind vielleicht die einzigen Nachteile der passiven- und hybriden Kühlsysteme gegenüber herkömmlichen Klimaanlage (die bei richtiger Dimensionierung vorausgesetzt) immer eine ausreichende Kühlleistung zur Verfügung stellen können und für die es richtige "Standard" Konzepte gibt, die in der Bauplanung viel schneller umgesetzt werden können.

Trotzdem überwiegen für mich die Vorteile der passiven- und hybriden Kühlsysteme, da sie elektrische Energie sparen und damit helfen die Umwelt zu schonen und die Kühlkosten senken.

Wieviel Energie die Sohlplattenrückkühlung gegenüber einer herkömmlichen Klimaanlage einsparen kann, habe ich Kapitel 6.2 überschlagen. Eine Analyse der Investitionskosten war nicht Bestandteil dieser Arbeit und fließt somit nicht in die Betrachtungen ein. Aber neben der Wirtschaftlichkeit sollte die Rohstoffeinsparung, die mit passiven und hybriden Systemen erzielt werden kann einen hohen Stellenwert bei der Planung erhalten.

Die Sohlplatte im Zentrum für umweltbewusstes Bauen ist ein gutes Beispiel dafür, dass individuelle Planungen und Anpassungen stattfinden müssen. Wie in Kapitel 6 eingangs erwähnt, ist das Bürogebäude u.a. als Forschungsobjekt erstellt worden. Das Prinzip der Sohlplattenrückkühlung ist bis jetzt sehr selten angewandt worden. Das bedeutet man kann nicht auf vorhandene Erfahrung zurückgreifen, sondern muss die Erfahrungen selber machen.

Die Leistungsfähigkeit der Sohlplatte im ZUB ist nach meinen Berechnungen, sehr eingeschränkt. Diese Einschränkung bedeutet nicht, dass das Raumklima in dem Bürogebäude unerträglich ist, sondern dass höhere Kühllasten bzw. Kühllastspitzen nicht so schnell und effektiv abgeführt werden können. In Kapitel 6 wird unter anderem beschrieben, dass den Speichermassen im ZUB zusätzlich durch die Nachtauskühlung Wärmeenergie entzogen wird und die Sohlplattenkühlung dadurch unterstützt. Nach eigenem Empfinden kann ich sagen, dass das Raumklima im ZUB durchaus auch an warmen Tagen angenehm ist.

Aus den Messungen, die zur Zeit stattfinden wird eine konkrete Aussage zur Leistungsfähigkeit unter bestimmten Randbedingungen (Außentemperatur, Uhrzeit usw.) getroffen werden können.

Die physikalischen Grundmöglichkeiten (Konvektion, Strahlung usw.) zur Kühlung sind nach meiner Meinung alle erkannt und auch schon in verschiedenen Projekten eingesetzt worden. Die Umsetzung in technische Lösungen, die effektive Kombination, die Anpassungen an allen äußeren Gegebenheiten und auch die messtechnische Aufnahme und Auswertung von realisierten Projekten sind weitere Tätigkeitsfelder die es zu untersuchen gilt.

Die weiter steigenden Behaglichkeitsansprüchen der Menschen an Ihre Umgebung, das steigende Umweltbewusstsein und die Kostenbetrachtung werden die Passiv -und Hybridkühlsysteme in Zukunft an Bedeutung zunehmen lassen und weiter ein breites Arbeitsfeld für Forschung und Planung geben.

8 Quellenangaben

- [1] Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.: Regenwasserzisterne zur Gebäudekühlung, www.zae-bayern.de
- [2] Fachinstitut Gebäude-Klima e.V.: Sorptionsgestützte Klimatisierung, Informationsschrift, www.fgk.de
- [3] Fachinstitut Gebäude-Klima e.V.: Mechanische Einzellüftungsanlagen im Wohnbau, Info-Blatt Nr. 1, www.fgk.de
- [4] Grells: Fassadenbegrünung, Dachbegrünung, www.grells.com/oekobauen.htm
- [5] Hardy, M.: A practical guide to free cooling, alternative cooling, night cooling and low energy systems, www.ambthair.com
- [6] Hauser, G.: Bauphysikalische Grundlagen, Vorlesungsskript Bauphysik I und II, Universität Kassel, 1997
- [7] Hellmann, H.-M.: Geothermische Heizung und Kühlung, www.zent-frenger.de
- [8] Hillmann, G. ;Nagel, J. ;Schreck, H.: Klimagerechte und Energiesparende Architektur, 3. Auflage, Müller, Karlsruhe, 1983
- [9] Ihle, C.: Der Heizungingenieur Band 4, Klimatechnik mit Kältetechnik, 3. Auflage, Werner-Verlag Düsseldorf, 1996
- [10] Kempkes, C.: Thermische Simulationsrechnungen zu dem Neubau des Zentrums für umweltgerechtes Bauen, Ingenieurbüro Prof. Dr. Gerd Hauser, 2001
- [11] Meierhans, R: Neuartige Kühlung von Bürogebäuden, NEFF Projekt 464 Schlussbericht, Meierhans & Partner AG, CH-8117 Fällanden
- [12] Mürmann, H.: Wohnungslüftung, Kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung für Wohnungen, C.F. Müller-Verlag, 1994
- [13] Rosenbaum, M.: Passive and Low Energy Cooling Survey, www.buildinggreen.com
- [14] RWE Energie Aktiengesellschaft: RWE Energie Bauhandbuch, Energie-Verlag Heidelberg, 12. Ausgabe
- [15] Santamouris, M. ;Asimakopolous, D.: Passive cooling of buildings, James & James (Science Publishers) Ltd, 1996
- [16] Schlegel, K.: Zentrum für Umweltbewusstes Bauen – Kassel, Diplomarbeit im Fachgebiet Technische Gebäudeausrüstung, Universität Kassel, 2001
- [17] Schweizerisches Institut für Glas am Bau: Definitionen von Begriffen in der Glastechnik, Strahlungsphysik, www.sigab.ch

-
- [18] Treberspurg, M.: Neues Bauen mit der Sonne, Ansätze zu einer klimagerechten Architektur, 2. Auflage, Springer-Verlag Wien, 1999
 - [19] Universität Oslo: Solar heating and radiativ cooling systems, www.fys.uio.no
 - [20] VDI-Richtlinien: VDI 2078, Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln), 1996
 - [21] VDI-Richtlinien: VDI 4640, Blatt 1, 2 und 4, Thermische Nutzung des Untergrundes, 2000
 - [22] Vetsch, P.: Earthhouse: Building Development, Construction Basics, <http://earthhouse.info>
 - [23] Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V.: Jahresbericht 2001, Kassel
 - [24] Zimmermann, M.: Handbuch der passiven Kühlung, EMPA ZEN, CH-8600 Dübendorf, 1999
 - [25] Zimmermann, M. ;Andersson, J.: Case Study Buildings, EMPA ZEN, CH-8600 Dübendorf, 1998

Bildquellen:

- [26] IEA Annex 37, Low Exergy Heating and Cooling Systems of Buildings, Surface heating and cooling, S. 47, <http://bim.ce.kth.se>
- [27] www.dr-schnitzer.de
- [28] www.geothermal-energie.ch
- [29] www.inselspringen.de
- [30] www.sahle-architekt.de
- [31] www.steingym.schulnetz.hamm.de
- [32] www.suntzu.larc.calpoly.edu/ehhf/background.html
- [33] www.uni-koeln.de
- [34] www.zent-frenger.de
- [35] www.zub-kassel.de