



Dokumentation PRIMERO – Komfort
Kühlsysteme – Funktionsweise und Grobdimensionierung

16. Dezember 2008
Arno Dentel / Udo Dietrich

Inhalt

1	Einleitung.....	2
2	Gegenüberstellung von Kühllast und der Tagessumme der Gesamtlast	3
2.1	Kurzverfahren zur Kühllastberechnung nach VDI 2078	5
2.2	Gesamtlast nach SIA 2021	9
2.3	Beispielsrechnungen	12
2.3.1	Büroraum mit Optimierungspotenzial	12
2.3.2	Optimierter Büroraum	13
2.3.3	Vergleich der Ergebnisse.....	16
3	Kühlsysteme - Funktion und Dimensionierung	17
3.1	Passives System – Natürliche Lüftung.....	17
3.2	Aktives System – Mechanische Lüftung.....	19
3.2.1	Mechanische Lüftung mittels Lut-Erdreichwärmetauscher.....	19
3.3	Aktives System – Hybridlüftung.....	20
3.4	Thermisch aktive Bauteile (TAB).....	21
3.5	Thermisch aktive Bauteile (TAB/Kapillarrohrmatten) – flinkes System.....	22
3.6	Kühldecke	22
4	Kältequellen – Eignung und Dimensionierung	23
4.1	Erdsonde	23
4.2	Energiepfahl, Schlitzwand	24
4.3	Grundwasser	25
4.4	Trocken- und Nasskühlturm (freie Kühlung).....	25
4.5	Kältemaschine	26
4.6	Wärmepumpe	26
5	Überblick Kühlsysteme und Kältequellen.....	27
6	Literatur	28

1 Einleitung

Ein komfortables Raumklima ist Voraussetzung für die Behaglichkeit in einem Gebäude. Zur Sicherstellung der thermischen Behaglichkeit (Wohlbefinden in einem Raum) trägt das Heizen und Kühlen des Gebäudes bei. Im Allgemeinen kann auf eine aktive Kühlung eines Gebäudes, im mitteleuropäischen Bereich, verzichtet werden.

Jedoch kommt es aufgrund von verschiedenen Entwicklungen, architektonisch wie auch nutzerspezifisch, zur Notwendigkeit, geeignete Maßnahmen zur Sicherstellung des thermischen Komforts in Gebäuden während der Sommerperiode zu ergreifen. Dies begründet sich unter anderem durch folgende Trends:

- Durch den zunehmenden Technisierungsgrad, insbesondere bei Verwaltungsgebäude, können die internen Wärmelasten, verursacht durch elektrische Geräte bzw. Arbeitshilfen, ansteigen. Diesem Trend kann man durch den Einsatz Strom sparender Geräte wie TFT-Bildschirmen und zentral schaltbaren Steckerleisten für Elektrogeräte entgegenwirken.
- Ebenso erhöht der architektonische Trend zu voll verglasten Fassaden und fehlendem außen liegenden Sonnenschutz die externen Wärmegevinne und dies resultiert häufig in einem Anstieg der Raumtemperatur.
- Häufig ist aber auch ein falsches Nutzerverhalten (etwa das Nicht-Ausschalten von Geräten / Kunstlicht bei Abwesenheit und Pausen) die Konsequenz für steigende Raumtemperaturen im Sommer.

Die Raumklimatisierung hat die Aufgabe, den vom Nutzer geforderten Komfort an die Raumtemperatur weitgehend zu erfüllen und die externen, wie auch internen, überschüssigen Wärmegevinne aus dem Raum abzuführen. Müssen Sollwerte bzw. Grenzwerte der Raumtemperatur und Raumluftfeuchte eingehalten werden, so ist dies nur durch eine aktive Klimatisierung möglich. Dies trifft vor allem in Museen oder Sondernutzungsbereichen zu. Im verbreiteten Verwaltungsbau ist dies nicht zwingend notwendig. Problematisch hingegen ist eine drastische Klimatisierung der Räume auf sehr niedrige Temperaturen, bei gleichzeitig hohen sommerlichen Außentemperaturen. Untersuchungen zeigen, dass sich das Behaglichkeitsempfinden der Nutzer mit der Außentemperatur ändert. Es findet eine Adaption an das Umgebungsklima statt [1]. Ein paralleles, geringes Ansteigen des Innenklimas mit dem Außenklima wird als durchaus normal und komfortabel empfunden.

Vorraussetzung für den thermischen Komfort beziehungsweise moderate Innentemperaturen bei sommerlichen Außentemperaturen ist ein optimiertes Gebäude. Der Begriff „optimiertes Gebäude“ umfasst, dass Wärmeeinträge auf ein erträgliches Maß reduziert werden und ein optimierter Regelbetrieb der technischen Anlagen vorherrscht. Im Detail sind dies beispielsweise folgende Maßnahmen:

- Guter Sonnenschutz: außenliegend oder baulich bedingt
- Verglasung mit geringer solarer Transmission: z.B. Sonnenschutzverglasung
- Thermische Speichermasse: z.B. massive freilegende Betondecken
- Erhöhte natürliche oder/und mechanische Nachtlüftung

Durch ein optimiertes Gebäude ist keine oder nur noch ein geringer Bedarf an Kühlung erforderlich.

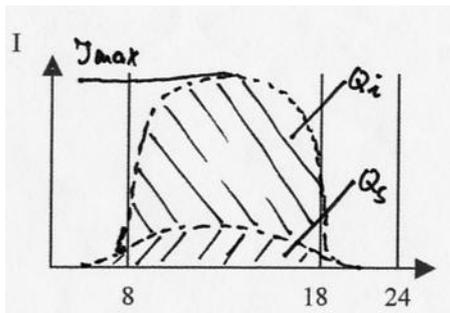
Bei der Planung und dem Betrieb der dann noch notwendigen technischen Systeme zur Klimatisierung/Konditionierung von Gebäuden ist auf eine ressourcenschonende und nachhaltige Betriebsweise zu achten. In den nachfolgenden Kapiteln wird deshalb überwiegend auf besonders Ressourcen schonende Techniken zur Sicherstellung und Verbesserung der thermischen Behaglichkeit im Sommer eingegangen.

2 Gegenüberstellung von Kühllast und der Tagessumme der Gesamtlast

Eine als zu hoch empfundene Raumtemperatur ist auf zu hohe, in den Raum eindringende Wärmeenergien zurück zu führen. Die primäre Optimierungsmöglichkeit zum Erreichen der gewünschten Temperaturen ist stets das Bestreben nach Reduktion dieser Wärmeenergien. Erst dann, wenn dieses Potenzial ausgeschöpft ist, muss versucht werden, die verbleibende, zu viel eindringende Wärme nach außen abzuführen. Ihre Größe wird bestimmt durch:

- Außenklima
- Fenstergröße, Orientierung, Sonnenschutz und Verglasung
- Anforderungen an das Raumklima (Temperatursollwerte)
- Bekleidung - Dresscode
- Interne Wärmelasten
- Bauweise
- Möglichkeiten der erhöhten Lüftung
- Regelung der gebäudetechnischen Anlagen¹

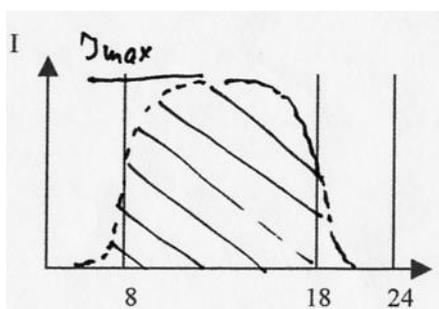
Die im Laufe eines Tages anfallende Wärmeenergie setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen. Ein Beitrag Q_s von Sonne und Himmel, im Sommer fällt dieser also länger an, als die eigentliche Nutzungszeit. Und dazu ein Beitrag Q_i von den Personen, elektrischen Geräten und Kunstlicht, der mit einem bestimmten Profil in der Nutzungszeit zusätzlich anfällt.



Bei optimierter Auslegung von Fensterflächenanteil, Verglasung und Sonnenschutz hat dabei Q_s den geringeren Anteil (wie hier dargestellt), bei nicht optimierter Auslegung dagegen eher den dominierenden!

Für die Art und Weise, WIE diese Wärmeenergie wieder nach außen abzuführen ist, OHNE dass es zu einer unkomfortablen Erhöhung der Raumtemperaturen kommt, gibt es zwei physikalisch grundlegend unterschiedliche Verfahrensweisen, die jeweils eigene Auslegungsmethoden haben.

a) Abführen der überschüssigen Wärme in dem Moment, wo sie anfällt (Verfahren „Kühllast“)
Das Kennzeichen ist deshalb die momentane Kühllast in $[W/m^2]$. Dies ist insbesondere der Verfahrensweise der konventionellen Klimaanlage. Der zeitliche Verlauf der Kühlleistung ist identisch mit dem Verlauf der anfallenden Wärme $Q_s + Q_i$, man spricht demnach von einem „flinken“ Kühlsystem.



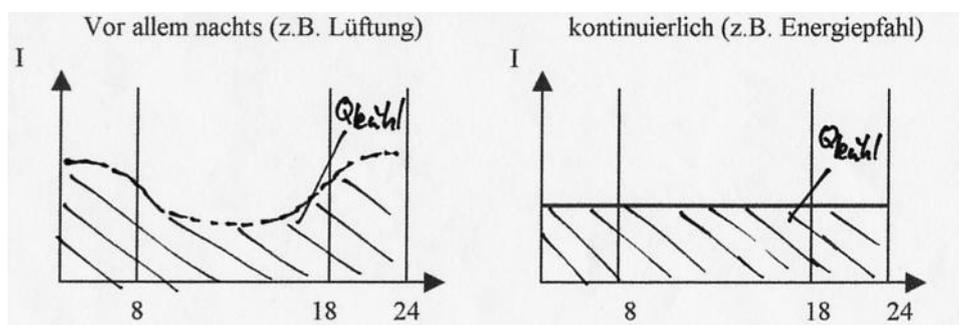
Eine sehr unökonomische Lösung, weil die Anlage auf die höchste denkbare Kühllast ausgelegt sein muss, und diese tritt praktisch nur an ganz wenigen Stunden auf. Also läuft die Anlage nahezu immer mit halber Kraft und schlechtem Wirkungsgrad.

Die Speicherfähigkeit der den betrachteten Raum umgebenden Bauteile wird zur Kühlung selbst nicht benötigt, sie geht in entsprechende Auslegungsverfahren nur indirekt ein als eine Größe, die die Spitzen der Raumtemperatur abmindert.

¹ Die Regelung geht nicht direkt in die Berechnung mit ein, hat aber einen großen Einfluss auf das Betriebsverhalten der Anlage.

Diese Kühlmethode ist damit zwar für alle Räume unabhängig von ihrer Bauart anwendbar, aber eigentlich so absolut nicht sehr intelligent. Sie verlässt sich ausschließlich auf die Leistungsfähigkeit der Klimaanlage und vernachlässigt, dass auch die speichernden Bauteile ein Bestandteil einer intelligenten und nachhaltigen Kühlanlage sein können.

b) Zwischenlagern der überschüssigen Wärme in den speichernden Bauteilen und Abführen im Laufe von 24 Stunden (Verfahren „Tagessumme der Gesamtlast“)
 Bei einem optimierten Gebäude, trägt das Gebäude zu einem Teil selbst zur Reduzierung der Kühllast bei. Das Prinzip ist: Die im Laufe eines Tages anfallende Wärme kann - ohne dass die Raumtemperatur groß ansteigt - in den speichernden Baustoffmassen „zwischenlagert“ werden. Damit braucht die im Laufe eines Tages anfallende Wärme [Wh/m² d] auch nur noch innerhalb von 24 Stunden abgeführt zu werden. Dies kann zeitverschoben geschehen (z.B. nachts durch erhöhte Lüftung) oder gleichmäßig über den gesamten Tag verteilt (z.B. Bauteilkühlung über Energiepfahl). Ein solches Kühlsystem wird ein „träges“ System genannt. Erst auf diese Weise ist es möglich, regenerative Kältequellen für die Kühlung sinnvoll zu benutzen.



Damit es funktioniert, darf natürlich die im Laufe eines Tages anfallende Wärme $Q_s + Q_i$ nicht größer sein als das Aufnahmevermögen Q_{Speicher} der speichernden Baustoffmassen. Je nach Bauart (von leicht bis sehr schwer) beträgt das Aufnahmevermögen der raumfassenden Bauteile 150 bis 250 Wh/m² d.

Tabelle 1 zeigt den Zusammenhang zwischen der Bauart und Bauschwere auf. Einen Überblick über die je nach Bauschwere abhängigen Grenzwerte der Tagessummen zeigt Tabelle 2.

Tabelle 1: Grobklassifizierung der Bauschwere

Bauart	Decken	Trennwände	Außenwand
Leicht	Leicht oder abgehängte Unterdecke	leicht	egal
Mittel	Leicht oder abgehängte Unterdecke	massiv, leicht (z.B. Porenbeton)	egal
Schwer	Massivdecke ohne Unterdecke	Massiv, leicht (z.B. Porenbeton)	egal
Sehr schwer	Massivdecke ohne Unterdecke	Massiv, schwer (z.B. KS)	egal

Tabelle 2: Grenzwerte der Tagessummen der passiven Klimatisierung

Bauart	Grenzwert $Q_i + Q_s$ [Wh/m ² d] für passive Klimatisierung
Leicht	150
Mittel	185
Schwer	210
Sehr schwer	250

Wie groß sind dagegen die Wärmeeinträge?

Solare Einstrahlung

Bei guter Auslegung liegt Q_s etwa bei 70 - 80 Wh/m² d. Dabei ist zu bedenken, dass mit dieser eher geringen Wärmelast bereits die Tageslichtversorgung des Raumes ausreichend ist.

Kunstlicht, elektrischen Geräten und Personen Q_i

Durch eine optimale Nutzung des Tageslichtes sollte Kunstlicht vermieden bzw. minimiert werden. Für die künstliche Beleuchtung können etwa $120 \text{ Wh/m}^2 \text{ d}$ Wärmeeintrag angesetzt werden. Der größte Anteil am Wärmeeintrag kommt aber von der eigentlichen Nutzung, also durch Personen und elektrische Geräte. Für die übliche Büronutzung ist der Wärmeeintrag je nach Technisierungsgrad zwischen 150 und $250 \text{ Wh/m}^2 \text{ d}$, für ein Einkaufszentrum sogar $350 \text{ Wh/m}^2 \text{ d}$, für einen prall gefüllten Hörsaal mit Projektion $700 \text{ Wh/m}^2 \text{ d}$.

Die Summe der Wärmeeinträge $Q_s + Q_i$ muss folglich in die speichernde Baustoffmasse abgeführt werden. Bei optimaler Ausführung des Gebäudes in allen Parametern liegt dieser Wert etwa zwischen $(150) 200$ bis $250 \text{ Wh/m}^2 \text{ d}$, bei nicht optimaler Ausführung dagegen auch bei bis zu $450 \text{ Wh/m}^2 \text{ d}$. Es ist zu erkennen, dass für ein nachhaltiges Kühlkonzept mit Nutzung der speichernden Bauteile als Zwischenspeicher eine optimierte Ausführung des Gebäudes eine notwendige Voraussetzung ist (vgl. Tabelle 4). Auch dann ist für die Umsetzung eine mindestens schwere, oft sogar eine sehr schwere Bauart notwendig, die im Verwaltungsbau aber andererseits nicht überall sinnvoll umgesetzt werden kann (z.B. Widerspruch zum Wunsch nach leichten, verschiebbaren Trennwänden). Damit ist der Einsatz träger Kühlsysteme und regenerativer Kältequellen aber durchaus noch nicht unmöglich, viel mehr erlauben hybride Systeme mit einer trägen Grundkühlung und einer flinken Spitzenkühlung ein breiteres Anwendungsfeld:

- | | | |
|-----|-----------------------------------|--|
| Ist | $Q_s + Q_i < Q_{\text{Speicher}}$ | dann ist eine rein träge Kühlung möglich |
| Ist | $Q_s + Q_i > Q_{\text{Speicher}}$ | dann können die Einträge $Q_s + Q_i$ bis zur Größe Q_{Speicher} über eine träge Grundkühlung abgeführt werden, die fehlende Differenz muss durch eine flinke Spitzenkühlung (z.B. mechanische Lüftung über Erdsonde) erbracht werden. |

Zur genaueren Beschreibung dieser beiden unterschiedlichen Prinzipien werden die Ergebnisse zweier zugehöriger Handrechenverfahren vergleichend vorgestellt:

- Kurzverfahren zur Kühllastberechnung nach VDI 2078 [2]
- Ermittlung der Tagessumme der Gesamtlast nach SIA 2021 [3]

2.1 Kurzverfahren zur Kühllastberechnung nach VDI 2078

Im Gegensatz zur Berechnung der Norm-Heizlast (Winterfall) eines Gebäudes ist wird die Kühllast unter nicht stationären Bedingungen berechnet, genauer gesagt ist die Kühllast eine Funktion der Zeit, da:

- Lastquellen (Sonneneinstrahlung, Außenlufttemperatur, innere Lasten) eine große zeitliche Verschiebung aufweisen.
- viele Lastquellen einen Strahlungsanteil besitzen, die zu Speichereffekten führen. Dies begründet sich dadurch, dass sich zunächst die Bauteile des Raumes erwärmen und dass es dann erst, mit zeitlicher Verzögerung und Amplitudendämpfung, zu einer Erwärmung der Raumluft kommt.

Diesen instationären Prozessen wird bei der Kühllastermittlung durch entsprechende Speicherfaktoren (Kühllastfaktoren, Gewichtungsfaktoren) Rechnung getragen. Nachfolgend werden die Gleichungen zur Kühllastberechnung kurz vorgestellt.

Allgemein

Die Kühllast eines Raumes resultiert aus innerer und äußerer Kühllast:

$$\dot{Q}_K = \dot{Q}_i + \dot{Q}_a$$

\dot{Q}_K : Gesamt - Kühllast

\dot{Q}_i : Innere Kühllast

\dot{Q}_a : Äußere Kühllast

Das Kurzverfahren ist für folgende Randbedingungen gültig:

- Konstante Raumtemperatur
- Periodische innere und äußere Belastungen
- Eingeschwungener Zustand
- 24 h-Betrieb der Anlage
- Konstanter Sonnenschutzfaktor (Abminderungsfaktor für Solarstrahlung F_c) der gesamten Fenster inkl. Verschattung

Innere Kühllast \dot{Q}_i

Die innere Kühllast setzt sich aus den Summanden folgender Wärmequellen zusammen:

- Wärmeabgabe durch Personen
- Wärmeabgabe durch Beleuchtung
- Wärmeabgabe durch andere innere Wärmequellen
- Wärmestrom aus dem Gebäudeinneren

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_P + \dot{Q}_B + \dot{Q}_G + \dot{Q}_{Ti}$$

\dot{Q}_P : Personenlast

\dot{Q}_B : Beleuchtungslast

\dot{Q}_G : Kühllast durch elekt. Geräte

\dot{Q}_{Ti} : Kühllast durch Transmission innerhalb des Gebäudes

Wärmeabgabe durch Personen:

$$\dot{Q}_P = \dot{q}_{Pers} \times n_{Pers}$$

\dot{q}_{Pers} : Sensible Wärmeabgabe pro Person

n_{Pers} : Anzahl der Personen

Wärmeabgabe durch Beleuchtung:

$$\dot{Q}_B = \dot{q}_B \times A \times l_1 \times \mu_B \times s_i$$

\dot{q}_{Pers} : spez. elektrische Anschlussleistung der Beleuchtung

A : Grundfläche

l_1 : Gleichzeitigkeitsfaktor

μ_B : Raumbelastungsgrad

s_i : Kühllastfaktor

Der Raumbelastungsgrad ist beispielsweise bei Abluftleuchten zu berücksichtigen, da der Wärmeeintrag zum Teil nicht in den Raum gelangt. Bei abgehängten Leuchten kann ein Raumbelastungsgrad von 1 angenommen werden. Der Kühllastfaktor variiert nach Bauschwere und auftreten der maximalen Last. Für einen mittelschweren Raum um 17 Uhr entspricht der Kühllastfaktor gleich 0,85.

Wärmeabgabe durch elektrische Geräte:

$$\dot{Q}_G = \dot{q}_G \times A \times l_1 \times s_i$$

\dot{q}_G : spez. Last Arbeitshilfen

A : Grundfläche

l_1 : Gleichzeitigkeitsfaktor

s_i : Kühllastfaktor



Wärmestrom aus dem Gebäudeinneren

$$\dot{Q}_{Ti} = U \times A \times \Delta T$$

U : Wärmedurchgangskoeffizient

A : Grundfläche

ΔT : Temperaturdifferenz Nachbarraum zu Bezugsraum

Äußere Kühllast \dot{Q}_a

Die äußere Kühllast wird durch Transmission durch Außenbauteile und Fenster bestimmt:

$$\dot{Q}_a = \dot{Q}_W + \dot{Q}_F + \dot{Q}_S$$

\dot{Q}_W : Kühllast infolge Aussenwände

\dot{Q}_F : Kühllast infolge Transmission durch Fenster

\dot{Q}_S : Kühllast infolge solarer Einstrahlung

Kühllast infolge von Außenbauteilen

$$\dot{Q}_W = \sum (U_i \times A_i \times \Delta_{aq,i})$$

U : Wärmedurchgangskoeffizient

A : Bauteilfläche

Δ_{aq} : äquivalente Temperaturdifferenz

Die äquivalente Temperaturdifferenz berücksichtigt die Speicherfähigkeit bzw. Phasenverschiebung des Temperaturmaximums der Bauteile. Die Temperaturdifferenz beträgt für eine westorientierte Wand der Bauartklasse 1 um 17 Uhr: 30,1. Die Richtlinie gibt in einer tabellarischen Übersicht weitere Werte für anders orientierte Flächen und Zeiten an.

Kühllast infolge Transmission durch Fenster

$$\dot{Q}_F = U \times A \times \Delta T$$

U : Wärmedurchgangskoeffizient

A : Grundfläche

ΔT : Temperaturdifferenz innen - außen

Kühllast infolge solare Einstrahlung durch Fenster

$$\dot{Q}_S = I_{\max} \times A \times b \times s_a$$

I_{\max} : Solare Einstrahlung (hinter 2-fach Verglasung)

A : Fensterfläche

b : Durchlassfaktor der Verschattung

s_a : Kühllastfaktor für äußere Strahlungslasten

Die Richtlinie gibt die solare Einstrahlung, die durch eine 2-fache Verglasung in den Raum fällt an. Der Durchlassfaktor ähnelt dem Fc-Wert einer Verschattung und ist ebenfalls aus der Richtlinie zu entnehmen. Der Kühllastfaktor ist bei der Berechnung der solaren Einstrahlung abhängig von Raum- und Verschattungstyp.

2.2 Gesamtlast nach SIA 2021

Die Bewertung der thermischen Behaglichkeit erfolgt nach der SIA Richtlinie anhand der resultierenden gesamten im Raum auftretenden Energien:

$$Q_{ges} = Q_s + Q_i$$

Q_s : mittlere tägliche solare Einstrahlung

Q_i : interene Wärmelast

Die Berechnung der Gesamtlast gibt eine erste Auskunft über die täglich resultierenden Lasten und erlaubt eine Abschätzung der zu erwartenden thermischen Behaglichkeit in Abhängigkeit des gewählten Lüftungs- und Kühlsystems.

Mittlere solare Last

Die mittlere tägliche solare Wärmelast im Raum Q_s in Wh/(m²d) ergibt sich aus folgender Beziehung:

$$Q_s = (g_{\perp, \text{Glas}} \times F_w \times G_{\text{offen}} + g_{\text{geschlossen}} \times G_{\text{geschlossen}}) \times \frac{A_g}{A_G}$$

$g_{\perp, \text{Glas}}$: g-Wert der Verglasung bei vertikalen Einfallswinkel	-
F_w	: Korrekturfaktor für nicht senkrechten Einfall	ca. 0,85
G_{offen}	: Tagessumme der Globalstrahlung bei offenem Sonnenschutz	Wh/(m ² d)
$g_{\text{geschlossen}}$: g-Wert der Verglasung und Sonnenschutz	-
$G_{\text{geschlossen}}$: Tagessumme der Globalstrahlung bei geschlossenem Sonnenschutz	Wh/(m ² d)
A_g	: Glasfläche	m ²
A_G	: Energiebezugsfläche (Grundfläche des Raumes)	m ²

Zur Ermittlung der im Raum wirksamen Solarstrahlung sind die bei offenem und geschlossenem Sonnenschutz auftretenden Strahlungstagesummen mit den jeweiligen maßgeblichen Gesamtenergiedurchlassgraden abzumindern. Da als Energiebezugsfläche die Grundfläche A_G verwendet wird, ist der Wert der abgeminderten Strahlung mit dem Verhältnis A_g/A_G von Glas zu Grundfläche umzurechnen.

Bei zweiseitig verglasten Eckräumen ist die Berechnung der mittleren täglichen solaren Wärmelast für beide Fassaden getrennt durchzuführen, wobei die einzelnen Wärmelasten dann zu addieren sind.

SIA 2021 gibt zur Abschätzung der mittleren solaren Last Q_s je nach Glasflächenorientierung folgende Mittelwerte für die Tagessummen der Global-/Gesamtstrahlung an (vgl. Tabelle 3):

- Sonnenschutz offen
- Sonnenschutz geschlossen
- ohne Sonnenschutz

Die Daten können in allererster Näherung auch für andere Standorte herangezogen werden. Der berücksichtigte Schwellwert für das Schließen des Sonnenschutzes beträgt 150 W/m². Die Albedo (Rückstrahlungsfähigkeit, sichtbarer Bereich) der Umgebung wurde mit 20 % angesetzt.

Tabelle 3: Mittlere Globalstrahlung je nach Fassadenorientierung

Sonnenschutz Orientierung	Mittlere Tagessummen der Globalstrahlung G in Wh/(m²d) Sommer für Außenlufttemperaturen 20 °C < Tamb ≤ 30 °C		
	Sonnenschutz offen G _{offen} (≤ 150 W/m²)	Sonnenschutz geschlossen G _{geschl.} (> 150 W/m²)	ohne Sonnenschutz G _{total}
Nord	1183	521	1704
Nordost	744	1607	2351
Ost	598	2692	3290
Südost	510	3184	3694
Süd	377	3194	3571
Südwest	507	3145	3652
West	617	2646	3263
Nordwest	768	1585	2353
Horizontal	244	5402	5646

Die in der letzten Spalte 4 „totale Globalstrahlung ohne Sonnenschutz“ G_{Total} stellt die im Tagesverlauf auf die betrachtete Fassade auftreffende Strahlung dar. Sie setzt sich aus dem Strahlungsanteil bei offenem Sonnenschutz G_{offen} und dem Strahlungsanteil bei geschlossenem Sonnenschutz G_{geschlossen} zusammen.

Insgesamt ergeben sich bei geschlossenem Sonnenschutz (bis auf nordorientierte Fassaden) gegenüber dem offenen Sonnenschutz deutlich höhere Tagessummen der Globalstrahlung, da die auftreffende Strahlungsdichte bei geschlossenem Sonnenschutz größtenteils deutlich über 150 W/m² liegt und der Sonnenschutz natürlich den größten Teil der Tageszeit geschlossen ist.

Interne Wärmelast

Zur internen Wärmelast Q_i in Wh/(m²d) tragen neben der Beleuchtung auch Personen und Elektrogeräte (z.B. EDV-Ausstattung) bei. Bei üblichen Raumhöhen ist bei Raumtiefen ab 4 m ist vielfach für die hinteren Bereiche eine Kunstlichtbeleuchtung erforderlich. Die Auswahl und Optimierung des Sonnenschutzes sollte dahingehend erfolgen, dass für die vorderen Raumbereiche bis 4 m Raumtiefe bei geschlossenem Sonnenschutz keine Kunstlichtzuschaltung erforderlich ist. Eine nach Helligkeit und Anwesenheit der Nutzer automatisch gesteuerte Beleuchtung kann ebenso eine deutliche Verringerung der internen Last bewirken. Zeitgemäße Beleuchtungskonzepte bieten neben einer zentralen Grundbeleuchtung eine arbeitsplatzbezogene Beleuchtung an. Dies birgt natürlich ein energetisch wie thermisches Einsparpotential.

Die Wärmeabgabe der Elektrogeräte richtet sich nach der Ausstattungsqualität des Arbeitsplatzes, der Gerätequalität und dem Abschaltungsbetrieb (manuell, Standby). Der Faktor von 0,9 berücksichtigt die Umrechnung der Nutzfläche des betrachteten Raums auf die Energiebezugsfläche.

$$Q_i = 0,9 \times (q_{\text{Bel}} \times t_{\text{bel}} \times \frac{A_{\text{Iz}}}{A_G} + q_i \times t_i)$$

q _{Bel}	: installierte Beleuchtungsleistung der Innenzone	W/m²
t _{Bel}	: Nutzungszeit Beleuchtung der Innenzone ab 4 m Raumtiefe	h/d
A _{Iz}	: hintere Nutzfläche der Innenzone ab 4 m Raumtiefe	m²
A _G	: Energiebezugsfläche (Bruttofläche des Raumes)	m²
q _i	: interne Last von Personen und Elektrogeräten	W/m²
t _{int}	: Nutzungszeit von Personen und Elektrogeräten	h/d

Ist die resultierende gesamte im Raum auftretende Last Q_{ges} berechnet lässt, sich anhand Tabelle 4 der thermische Komfort bei verschiedenen Lüftungs- und Klimasystemen in erster Näherung ermitteln. An dieser Stelle sei angemerkt, dass es sich in Tabelle 4 um statische Temperaturgrenzen handelt. Eine zeitgemäßere Beurteilung des adaptiven Temperaturverhaltens, wie beispielsweise in ISSO 74 [2], lässt genauere Prognosen des zu erwartenden thermischen Komforts zu.



Tabelle 4; Matrix zur Risikobeurteilung des thermischen Komforts im Sommer modifiziert nach SIA 2012

	Mittlere Tagessummen der Gesamtlast Q_{Ges} in Wh/(m ² d)			
	150	250	350	450
<i>Systeme zur Lüftung und Kühlung</i>	<i>Beurteilung thermischer Komfort, Systemwahl</i>			
Haustechniksystem 0 Nur Fensterlüftung * Komfort der Fensterlüftung tags Bewertung des Haustechnik-Systems	evtl. genügend evtl. genügend	ungenügend ungenügend	unzumutbar ungenügend	unzumutbar ungenügend
Haustechniksystem 1 Mech. Lüftung u. Nachtlüftung (LW > 2,0 h⁻¹) Komfort ohne Fensterlüftung tags Komfort mit Fensterlüftung tags* Bewertung des Haustechnik-Systems	28 ... 29 °C evtl. genügend genügend angemessen	29 ... 31 °C ungenügend evtl. genügend evtl. genügend	30 ... 32 °C unzumutbar ungenügend ungenügend	31 ... 34 °C unzumutbar unzumutbar ungenügend
Haustechniksystem 2 wie 1 + Primärluftkühlung Komfort ohne Fensterlüftung tags Komfort mit Fensterlüftung tags* Bewertung des Haustechnik-Systems	26 ... 27 °C gut sehr gut optimal	27 ... 29 °C genügend gut angemessen	28 ... 31 °C ungenügend evtl. genügend evtl. genügend	29 ... 33 °C unzumutbar ungenügend ungenügend
Haustechniksystem 3 wie 2 + Zusatzkühlung tags (20 Watt/m² / 220 Wh/m²d) Komfort ohne Fensterlüftung tags Komfort mit Fensterlüftung tags* Bewertung des Haustechnik-Systems	<< 26 °C gut gut überdimension.	< 26 °C genügend sehr gut optimal	26 ... 27 °C ** genügend ** gut angemessen	27 ... 28 °C ** ungenügend ** evtl. ungenügend ** evtl. ungenügend **
Empfohlene Bauart / Bauschwere	Leichte bis mittelschwere Bauart	Schwere bis sehr schwere Bauart	Sehr schwere Bauart	
Einstufung der energetischen Güte	gute/optimierte Planung effiziente Ausstattung		Optimierungsbedarf Ausstattung und Bauphysik prüfen	

* Die unterstützende Fensterlüftung tagsüber muss am gegebenen Standort (Lärmbelastung) möglich sein: Die Komfoteinstufung setzt eine angemessene manuelle Bedienung durch die Benutzer voraus (situationsangepasstes Nutzerverhalten). Zudem muss die zu öffnende Fensterfläche eine minimale Abmessung (mindestens 3 % (CH) bzw. 4 % (D) der Bruttogrundfläche) aufweisen.

** Bei hohen Gesamtlasten muss die Zusatzkühlung (Leistung und / oder Laufzeit) entsprechend erhöht werden, um den gewünschten thermischen Komfort zu erreichen

2.3 Beispielrechnungen

Anhand zwei verschiedener Büroräume werden die beiden vorgestellten Verfahren miteinander verglichen.

2.3.1 Nicht optimierter Büroraum

Geometrie - Ausrichtung

Breite:	3.50 m	Fläche:	17.50 m ²
Tiefe:	5.00 m	Volumen:	52.50 m ³
Höhe:	3.00 m	Fensterfläche:	7.00 m ² (Süd)

Bauphysikalische Angaben

g-Wert der Verglasung:	0.60
Außen liegender Sonnenschutz, F _c -Wert:	0.25
Raumtyp, Bauschwere:	schwer

Innere Lasten und Belegung

Personenbelegung:	2 Personen (a 70 Watt): 8 W/m ²
Beleuchtungsleistung:	10 W/m ²
Arbeitshilfen:	2 PC a 100 Watt: 11 W/m ²
Arbeitszeit:	8.00 bis 18.00 Uhr (10 h/d)

Tagessumme der Gesamtlast nach SIA 2012

$$Q_s = (g_{\perp, \text{Glas}} \times F_W \times G_{\text{offen}} + g_{\text{geschlossen}} \times G_{\text{geschlossen}}) \times \frac{A_g}{A_G}$$

$$Q_s = (0.60 \times 0.85 \times 377 \text{ Wh/m}^2\text{d} + (0.60 \times 0.25) \times 3194 \text{ Wh/m}^2\text{d}) \times \frac{7.5 \text{ m}^2}{17.5 \text{ m}^2}$$

$$Q_s = (192.27 \text{ Wh/m}^2\text{d} + 479.10 \text{ Wh/m}^2\text{d}) \times 0.43$$

$$Q_s = 289 \text{ Wh/m}^2\text{d}$$

$$Q_i = 0.9 \times (q_{\text{Bel}} \times t_{\text{bel}} \times \frac{A_{\text{IZ}}}{A_G} + q_i \times t_i)$$

$$Q_i = 0.9 \times (10 \text{ W/m}^2 \times 10 \text{ h/d} \times \frac{3.5 \text{ m}^2}{17.5 \text{ m}^2} + (8 \text{ W/m}^2 + 11 \text{ W/m}^2) \times 10 \text{ h/d})$$

$$Q_i = 0.9 \times (20 \text{ Wh/m}^2\text{d} + 190 \text{ Wh/m}^2\text{d})$$

$$Q_i = 189 \text{ Wh/m}^2\text{d}$$

$$Q_{\text{ges}} = Q_s + Q_i$$

$$Q_{\text{ges}} = 289 \text{ Wh/m}^2\text{d} + 189 \text{ Wh/m}^2\text{d}$$

$$Q_{\text{ges}} = 478 \text{ Wh/m}^2\text{d}$$

Kurzverfahren zur Kühllastberechnung nach VDI 2078

Die Kühllast wird für einen heiteren Julitag um 12 Uhr und eine Raumtemperatur von 24 °C berechnet.

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_P + \dot{Q}_B + \dot{Q}_G + \dot{Q}_{Ti}$$

$$\dot{Q}_i = 2 \times 70 \text{ W} + 10 \text{ W/m}^2 \times 17.5 \text{ m}^2 \times 1 \times 1 \times 0.85 + 11 \text{ W/m}^2 \times 17.5 \text{ m}^2 \times 1 \times 0.82 + 0$$

$$\dot{Q}_i = 140 \text{ W} + 148.75 \text{ W} + 157.85 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_i = 446.60 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_a = \dot{Q}_W + \dot{Q}_F + \dot{Q}_S$$

$$\dot{Q}_a = (0.35 \text{ W/m}^2\text{K} \times 3.5 \text{ m}^2 \times 24.7 \text{ K}) + (1.1 \text{ W/m}^2\text{K} \times 7.0 \text{ m}^2 \times (28.8 - 24) \text{ K}) + (385 \text{ W/m}^2 \times 7.0 \text{ m}^2 \times \left(\frac{0.25}{0.8}\right) \times 0.53)$$

$$\dot{Q}_a = (30.26 \text{ W}) + (36.96 \text{ W}) + (446.36 \text{ W})$$

$$\dot{Q}_a = 513.58 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_K = \dot{Q}_i + \dot{Q}_a$$

$$\dot{Q}_K = 446.60 \text{ W} + 513.58 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_K = 960.18 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_K = 55 \text{ W/m}^2$$

2.3.2 Optimierter Büroraum

Geometrie - Ausrichtung

Breite:	3.50 m	Fläche:	24.50 m ²
Tiefe:	7.00 m	Volumen:	73.50 m ³
Höhe:	3.00 m	Fensterfläche:	5.00 m ² (Süd)

Bauphysikalische Angaben

g-Wert der Verglasung:	0.35
Außenliegender Sonnenschutz, Fc-Wert:	0.25
Raumtyp, Bauschwere:	schwer

Innere Lasten und Belegung

Personenbelegung:	2 Personen (a 70 Watt): 6 W/m ²
Beleuchtungsleistung:	10 W/m ²
Arbeitshilfen:	2 PC a 100 Watt: 8 W/m ²
Arbeitszeit:	8.00 bis 18.00 Uhr (10 h/d)

Tagessumme der Gesamtlast nach SIA 2012

$$Q_S = (g_{\perp, \text{Glas}} \times F_W \times G_{\text{offen}} + g_{\text{geschlossen}} \times G_{\text{geschlossen}}) \times \frac{A_g}{A_G}$$

$$Q_S = (0.35 \times 0.85 \times 377 \text{ Wh/m}^2\text{d} + (0.35 \times 0.25) \times 3194 \text{ Wh/m}^2\text{d}) \times \frac{5.0 \text{ m}^2}{24.5 \text{ m}^2}$$

$$Q_S = (112.16 \text{ Wh/m}^2\text{d} + 279.48 \text{ Wh/m}^2\text{d}) \times 0.20$$

$$Q_S = 78.33 \text{ Wh/m}^2\text{d}$$



$$Q_i = 0.9 \times (q_{\text{Bel}} \times t_{\text{bel}} \times \frac{A_{\text{IZ}}}{A_{\text{G}}} + q_i \times t_i)$$

$$Q_i = 0.9 \times (10 \text{ W/m}^2 \times 10 \text{ h/d} \times \frac{10.5 \text{ m}^2}{24.5 \text{ m}^2} + (6 \text{ W/m}^2 + 8 \text{ W/m}^2) \times 10 \text{ h/d})$$

$$Q_i = 0.9 \times (42.86 \text{ Wh/m}^2\text{d} + 140 \text{ Wh/m}^2\text{d})$$

$$Q_i = 164.57 \text{ Wh/m}^2\text{d}$$

$$Q_{\text{ges}} = Q_{\text{S}} + Q_i$$

$$Q_{\text{ges}} = 78.33 \text{ Wh/m}^2\text{d} + 164.57 \text{ Wh/m}^2\text{d}$$

$$Q_{\text{ges}} = 243 \text{ Wh/m}^2\text{d}$$

Kurzverfahren zur Kühllastberechnung nach VDI 2078

Die Kühllast wird für einen heiteren Julitag um 12 Uhr und eine Raumtemperatur von 24 °C berechnet.

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_P + \dot{Q}_B + \dot{Q}_G + \dot{Q}_{Ti}$$

$$\dot{Q}_i = 2 \times 70 \text{ W} + 10 \text{ W/m}^2 \times 24.5 \text{ m}^2 \times 1 \times 1 \times 0.85 + 8 \text{ W/m}^2 \times 24.5 \text{ m}^2 \times 1 \times 0.82 + 0$$

$$\dot{Q}_i = 140 \text{ W} + 148.75 \text{ W} + 160.72 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_i = 496.72 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_a = \dot{Q}_W + \dot{Q}_F + \dot{Q}_S$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_a = & (0.35 \text{ W/m}^2\text{K} \times 5.5 \text{ m}^2 \times 24.7 \text{ K}) + (1.1 \text{ W/m}^2\text{K} \times 5.0 \text{ m}^2 \times (28.8 - 24) \text{ K}) + \\ & + (385 \text{ W/m}^2 \times 5.0 \text{ m}^2 \times (\frac{0.25}{0.8}) \times 0.53) \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_a = (47.55 \text{ W}) + (26.4 \text{ W}) + (318.83 \text{ W})$$

$$\dot{Q}_a = 392.78 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_K = \dot{Q}_i + \dot{Q}_a$$

$$\dot{Q}_K = 496.72 \text{ W} + 392.78 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_K = 889.5 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_K = 36 \text{ W/m}^2$$



2.3.3 Vergleich der Ergebnisse

Die Berechnungsergebnisse der beiden vorgestellten Verfahren für die beiden Räume (nicht optimiert und optimiert) sind in Tabelle 5 dargestellt. Die Berechnungsergebnisse der beiden Verfahren sind nicht direkt miteinander vergleichbar, da das Verfahren nach SIA die Summe der inneren und äußeren Lasten eines Tages berechnet und die Kühllast nach VDI 2078 nur die maximale Kühllast für einen bestimmten Auslegungsfall angibt.

Vergleichend kann jedoch festgestellt werden, dass bei Kühllast nach VDI 2078, die Leistung ermittelt wird, die für einen maximalen Auslegetag bzw. Stunde benötigt wird, um den Raum auf das gewünschte Temperaturniveau zu konditionieren. In der Praxis führt dies zu großen technischen Anlagen, die nur an sehr wenigen Stunden im Jahr ihre volle Leistung bereitstellen müssen. Das SIA Verfahren gibt dem Planer/Architekt in frühen Planungsstadien Hinweise, welche technischen Systeme vorgehalten werden müssen, um ein behagliches Raumklima im Sommer zu erreichen.

Jedoch zeigen beide Berechnungsergebnisse, dass durch eine Optimierung (hier Grundriss und Bauphysik) die zu erwartenden Lasten um ca. 48 % (SIA) bzw. 35 % (VDI) senkt.

Tabelle 5: Vergleich der Berechnungsergebnisse

Berechnungsverfahren ⇒	Tagessumme der Gesamtlast nach SIA 2012	spezifische Kühllast nach VDI 2078 (Kurzverfahren)
Raumvariante ↓		
Büroraum mit Optimierungspotenzial	475 Wh/m ² d	55 W/m ²
Optimierter Büroraum	243 Wh/m ² d	36 W/m ²

3 Kühlsysteme - Funktion und Dimensionierung

3.1 Passives System – Natürliche Lüftung

Unser Klima bietet verhältnismäßig gute Voraussetzungen, um ein Gebäude natürlich zu belüften. Die natürliche Lüftung kann vor allem auch im Sommer durch erhöhten Luftwechsel eine passive Raumkühlung erzielen.

Das Grundprinzip der natürlichen Lüftung ist, dass als wirksamer Antrieb eine Temperaturdifferenz der Luft innen / außen da ist (der Wind, wenn er denn da ist, begünstigt dann die Lüftung zusätzlich). Nach dem Schornsteinprinzip wird dann ein Auftrieb erzeugt, der die Luft bewegt. Entscheidend ist dabei, welche „Beschleunigungsstrecke“ die Luft hat. Das ist die Höhendifferenz zwischen warm (innen) und kalt (außen). Für das Lüften über Fenster in normal hohen Räumen ist das die Fensterhöhe – also sehr mäßig (deshalb muss viel öffnbare Fensterfläche vorhanden sein).

Wesentlich effizienter wird die Effektivität bei Höhendifferenzen über 4 m (es genügen dann kleinere Lüftungsöffnungen). Entweder der Raum hat selbst diese Höhe (Hallen mit „Dachaufsatzlüftung“), oder die Lüftung erfolgt über einen Schacht (das Prinzip der „Kölner“ oder „Berliner Lüftung“).

Im Sommer ist dann eine Abkühlung zu erzielen, wenn es draußen kälter ist als innen. Das ist vor allem nachts (etwa von 22 bis 6 Uhr) der Fall. In Verbindung mit speichernden Baustoffmassen kann ein **wirksame Kühlung von 150 Wh/m² d** erreicht werden. Ist es tagsüber innen und außen genauso heiß, dann ist es das Beste, alles dicht zu halten und den Luftaustausch auf das hygienisch Erforderliche zu beschränken. Bei technisierten Verwaltungsgebäuden kann es innen, aufgrund der hohen inneren Wärmequellen, auch bei verträglichen Außentemperaturen (z.B. 24°C), schon zu einem Aufschaukeln der Raumtemperatur kommen. Dann kann eine erhöhte Lüftung auch tagsüber sinnvoll sein.

Ein Raum/Gebäude kann beispielsweise über folgende Konzepte natürlich be- und entlüftet werden:

1. Fensterlüftung über eine Fassadenöffnung

Erfolgt die Lüftung über eine einseitige Fassadenöffnung (Fenster/separate Lüftungsöffnung) können Räume bis zu einer Tiefe von maximal 2.5 mal lichte Raumhöhe noch überall mit Luft versorgt werden. Die gesamte öffnbare Fläche beträgt mindestens 400 cm² pro m² Nutzfläche (ca. 4% der Nutzfläche!) oder 2400 cm² pro Person. Somit können **Luftwechselraten von 1.0 h⁻¹ (tags) bzw. 1.5 h⁻¹ (nachts)** erzielt werden.

2. Querlüftung

Bei einer Lüftung über gegenüberliegende Fassaden können Räume bis zu einer Tiefe von maximal 5 mal lichte Raumhöhe noch überall mit Luft versorgt werden. Die gesamte öffnbare Fläche beträgt pro Seite mindestens je 120 cm² pro m² Nutzfläche (das sind je 1.2 % der Nutzfläche!) oder 720 cm² pro Person.

Bei Querlüftung können **Luftwechsel von 2.0 h⁻¹ (tags) bzw. 3.0 h⁻¹ (nachts)** realisiert werden.

3. Lüftung über Höhendifferenz

Besteht zwischen der Zu- und Abluftöffnung eine Höhendifferenz von mehr als 4 m, so können ebenfalls Räume bis zu einer Tiefe von maximal 5 mal lichte Raumhöhe noch überall mit Luft versorgt werden. Für die öffnbare Fläche der Zuluftöffnungen (Fenster) genügen 80 cm² pro m² Nutzfläche (das sind je 0.8 % der Nutzfläche!) oder 480 cm² pro Person.

Bei Lüftung über Höhendifferenz können **Luftwechsel von 3.0 h⁻¹ (tags) bzw. 4.5 h⁻¹** erzielt werden.

4. Erhöhte Lüftung nachts im Sommer über Höhendifferenz

Zur Abkühlung der erwärmten speichernden Bauteile ist ein besonders hoher Luftwechsel mit der kalten Nachtluft erwünscht. Die praktische Erfahrung zeigt, dass hierfür selbst eine Querlüftung noch nicht ausreichend ist. Erst eine erhöhte Nachtlüftung über Höhendifferenz durch separate Lüftungsschächte oder ins Gebäude integrierte Atrien kann das Kühlpotenzial der Nachtluft ausschöpfen.

Aufgrund von höheren Temperaturdifferenzen können in der Praxis höhere Luftwechsel (ca. 10 h⁻¹) resultieren. Diese treten jedoch nicht ganzjährig konstant auf und es wird nicht empfohlen diese als Planungswerte heranzuziehen.



3.2 Aktives System – Mechanische Lüftung

Ist eine natürliche Belüftung des Gebäudes nicht möglich, so kann eine mechanische Lüftung durchaus sinnvoll sein. Neben dem Winterbetrieb mit einer Wärmerückgewinnung ergeben sich im Sommer weitere Vorteile:

- Tagsüber kann der hygienisch erforderliche Luftwechsel sehr genau eingehalten werden, ohne dass zu viel (heiße) Außenluft eindringt. Mit natürlicher Lüftung geht das nur schlecht. Nachts kann ein erhöhter Luftwechsel von 4 h^{-1} (noch mehr verbraucht zu viel Strom) ebenso zuverlässig erreicht werden. Die wirksame **Kühlung ist dann bis zu $200 \text{ Wh/m}^2 \text{ d}$** .
- Die Luft kann mit regenerativen Kältequellen vorgekühlt werden, beispielsweise über einen Luft-Erdreichwärmetauscher.

Für den Tagbetrieb genügt oft eine Auslegung auf den hygienischen Mindestluftwechsel von 20 bis 40 m^3/h Person.

3.2.1 Mechanische Lüftung und Luft-Erdreichwärmetauscher

Im Erdreich werden Rohre verlegt, durch die die Zuluft für eine Lüftungsanlage angesaugt wird. Dadurch ist die Luft im Winter bereits vorerwärmt und im Sommer abgekühlt.

Da diese vorerwärmte/abgekühlte Zuluft mechanisch bewegt und dann im Gebäude verteilt werden muss, ist eine mechanische Zu- und Abluftanlage im Gebäude eine Voraussetzung. Der Luft-Erdreichwärmetauscher ist also eine sinnvolle Ergänzung einer bereits vorhandenen Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung.

Funktion

Die Temperatur in der Erde verändert sich mit zunehmender Tiefe sehr schnell. An der Oberfläche entspricht sie der aktuellen Lufttemperatur, nach 3 m Tiefe hat sie sich weitgehend, nach 10 m Tiefe vollständig auf die durchschnittliche jährliche Lufttemperatur von etwa $9 \text{ }^\circ\text{C}$ angepasst. Dieser riesige Speicher mit etwa $9 \text{ }^\circ\text{C}$ ist natürlich interessant. Ist es draußen kälter (Winter), kann die Luft bis auf diese $9 \text{ }^\circ\text{C}$ aufgeheizt werden. Ist es draußen wärmer (Sommer), kann die Luft abgekühlt werden. Und das Alles (bis auf den Ventilatorstrom) ganz regenerativ.

Konstruktion

Für die Konstruktion von Luft-Erdreichwärmetauscher gibt es einige Faustregeln zur Vordimensionierung:

- Der Abstand zwischen zwei Rohren soll mindestens das 3 bis 4 -fache des Rohrdurchmessers betragen.
- Die optimale Verlegetiefe ist 3 m, die optimale Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Rohr ist 2 m/s .
- Ein m^2 Erdreichwärmetauscher versorgt etwa $1,5 \text{ m}^2$ Nutzfläche.

Sommerliches Verhalten

Bei einer Verlegetiefe von 3 m wird die warme Außenluft auf höchstens $20 \text{ }^\circ\text{C}$ gekühlt.

Wird mit dem hygienisch erforderlichen Luftwechsel gearbeitet, dann ist die so produzierte Kälteleistung im Vergleich zu den Wärmeeinträgen (Sonne, Geräten, Kunstlicht und Menschen) relativ gering. Eine Erhöhung des Luftwechsels mindert die Gesamtenergieeffizienz des Systems. Liegt die Außentemperatur (nachts) unter $19 \text{ }^\circ\text{C}$, dann sollte der Luft-Erdreichwärmetauscher besser mit einem Bypass umfahren und das Gebäude direkt mit Außenluft gekühlt werden.

Die erzielbare Kühlung liegt bei etwa $50 \text{ Wh/m}^2 \text{ d}$, in Kombination mit der Lüftungsanlage also bei etwa $250 \text{ Wh/m}^2 \text{ d}$.

Winterliches Verhalten

Die gesamte Lüftungsanlage, bestehend aus Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung und Luft-Erdreichwärmetauscher (der es alleine auf einen Wirkungsgrad von etwa 35 % bringt) hat insgesamt einen Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung von mindestens 80 %.



3.3 Aktives System – Hybridlüftung

Die Kombination aus natürlicher und mechanischer Lüftung wird als Hybridlüftung bezeichnet. Bei niedrigeren sommerlichen Außentemperaturen sollte ein Gebäude ohne mechanische Lüftung auskommen und natürlich belüftbar sein. Nur im tiefen Winter (Wärmerückgewinnung) und bei Hitzeperioden im Sommer wird die Lüftung zur Komfortverbesserung eingesetzt. Die Hybridlüftung lässt sich ebenfalls mit einem Luft-Erdreichwärmetauscher kombinieren.

Ein weiterer Vorteil der Hybridlüftung ist eine zuverlässige Regelung bzw. Steuerung, falls eine automatische Steuerung der Lüftungsöffnungen für die natürliche Lüftung nicht möglich ist. In diesem Fall wird das Gebäude durch die mechanische Lüftung an Tagen ohne Nutzung konditioniert.

Die erzielbare Kühlung liegt bei etwa 200 Wh/m² d, in Kombination einem Luft-Erdreichwärmetauscher bei etwa 250 Wh/m² d.

3.4 Thermisch aktive Bauteile (TAB)

Der Kern der Anlage ist, dass die **massive und frei liegende Betondecke** zum Kühlelement wird. Damit entsteht ein träges System, das tagsüber Wärme aus dem Gebäude schluckt, die dann vor allem nachts wieder nach draußen geschafft wird. 10 cm Beton können 65 Wh/m² Wärme aufnehmen, 30 cm Beton bis zu 200 Wh/m². Die optimale **Dicke der Decke liegt zwischen 15 und 30 cm**.

Damit die Wärme transportiert werden kann, ist die Decke von Rohren durchzogen, durch die Wasser (oder auch Luft) als Transportmedium befördert wird. Der **Rohrabstand beträgt etwa 15 cm**, der Durchmesser wenige cm (z.B. Rohrdurchmesser 17,0 x Wandstärke 2,0 mm).

Die Trägheit dieses Systems schafft eine angenehme Strahlungskälte (der inverse Kachelofen), begrenzt aber auch die maximale **Kälteabgabe** in den Raum auf **250 Wh/(m² d)**. Weiter muss wegen der Trägheit der gesamte Energiehaushalt unter Kontrolle sein, weil das System sonst auf plötzliche Energieeinträge nicht rasch genug reagieren könnte. Deshalb ist eine mechanische Zu- und Abluftanlage im Gebäude eine Voraussetzung, auch um etwaige Kondensationsprobleme auf den Bauteilflächen zu verhindern.

Im Winter kann diese Lüftung zur Wärmerückgewinnung genutzt werden. Ebenso wird die Decke dann zum Niedertemperatur – Heizkörper.

Die Kühlung erfolgt am Besten sowohl über die Decken (Grundkühlung) als auch über die Zuluft (Spitzenkühlung). Die **wirksame Kühlung mittels Betonkernaktivierung beträgt ohne Wärmepumpe etwa 200 Wh/(m² d), mit Wärmepumpe 250 Wh/(m² d)**.

Die **spezifischen Kühlleistungen** liegen bei Systemen mit Betonkerntemperierung bei max. **40 W/m²**, dabei liegen die üblichen Vorlauftemperaturen im Sommer bei 18 °C (Spreizung: 2 bis 4 K = Differenz Eintritts- minus Austrittstemperatur).

Vorteile der thermisch aktiven Baufächen:

- **Hohe thermische Behaglichkeit** (bei richtiger Flächenplatzierung ausgezeichnete Kompensation des Fassadeneinflusses, kein Zugrisiko, keine Geräusche, geringe Luftgeschwindigkeiten)
- **Verstärkte Nutzung regenerativer Energien aus der Umgebung des Gebäudes: „Umweltkälte“** (große Wärmeübertragerflächen im Raum gestatten die Nutzung von Wärmesenken und Wärmequellen, deren Temperaturen nahe an der Umgebungstemperatur liegen, z.B. **freie Kühlung, Erdwärme**)
- **Niedrige Betriebskosten** (geringe Transportenergie bei Einsatz von Wassersystemen, geringerer Primärenergieverbrauch durch Nutzung von „Umweltkälte“ (, hohe Leistungszahlen bzw. geringer Primärenergiebedarf beim Betrieb von Kältemaschinen und Wärmepumpen)
- **Kein Stellflächenverlust im Raum**

Nachteile und **Grenzen** der thermisch aktiven Baufächen:

- **Begrenzte Kühl- und Heizleistung**, da die Vorlauftemperatur wegen dem Selbstregelleffekt und der Systemträgheit begrenzt ist
- **Hohe Qualität** in Planung, Ausführung und Betrieb erforderlich (Speichermanagement statt üblicher Regelung nötig; Messtechnik; hohe Massenströme und geringe Spreizungen, d.h. Hilfsenergieaufwand beachten)
- Systemplanung mit Bauphysik erforderlich (Akustik, Wärmeschutz etc.)

Sind die thermisch aktiven Bauteile das einzige Kühlsystem und stehen keine weiteren Systeme, wie beispielsweise eine Grundkühlung (geringer vorkonditionierter maschineller Luftvolumenstrom) oder eine Zusatzkühlung (erhöhter gekühlter Luftvolumenstrom) zu Verfügung, können sich folgende Einschränkungen ergeben:

- **Keine Einzelraumregelung** möglich, eine exakte Raumtemperatur ist nicht garantierbar
- Individuelle Beeinflussung nur durch ein Zusatzsystem oder durch Maßnahmen wie Fensterlüftung möglich (keine Thermostatventile)
- **Begrenzte Flexibilität** hinsichtlich Zonierung und Lastabfuhr

3.5 Thermisch aktive Bauteile (TAB/Kapillarrohrmatten) – flinkes System

Entscheidend für die Betriebsweise von thermisch aktiven Bauteilen ist die **Höhenanordnung der Rohre** in der Decke bzw. im Fußboden.

Untenliegende Rohrregister (z.B. Kapillarrohrmatten) bewirken während der nächtlichen Beladung eine starke Raumauskühlung, weshalb die Ladezeit verkürzt werden muss, dabei verringert sich die Nutzbarkeit des Speichers.

Raumnahe Rohrregister ermöglichen aber mit dem gleichen System eine gut regelbare Nachkühlung am Tage, so dass die geforderte Raumtemperatur gewährleistet werden kann.

Es zeigt sich, dass die nachts verfügbare „Umweltkälte“ auch in relativ dünnen Decken (z.B. 18 cm) nutzbar ist, eine Bedarfskühlung am Tage zur Komfortverbesserung und Leistungsanpassung ermöglicht wird sowie bei entsprechender Gestaltung der Filigrandecken und der Anschlussverrohrung sogar eine raumweise Temperaturregelung realisiert werden kann. Ein **extrem obenliegendes Rohrregister** (nachträgliche Nutzung der Speicherkapazität von Massivdecken im Sanierungsfall) ermöglichen ebenfalls gute Nutzungsbedingungen.

Dabei können bei einer Wassertemperatur von 18 °C (Spreizung: 2 bis 3 K) **spezifische Kühlleistungen** von bis zu **70 W/m²** erreicht werden.

3.6 Kühldecke

Eine günstige Lösung zur leistungsstarken und behaglichen Lastabfuhr bietet der Einbau einer Kühldecke kombiniert mit dem hygienisch erforderlichen bedingten Luftvolumenstrom und zeigen bei veränderten Lasten, z.B. bei Nutzungsänderungen im Gebäude, sehr gute Möglichkeiten zur Leistungsanpassung.

Die maximale **Kälteabgabe** in den Raum liegt bei bis zu **900 Wh/(m² d)**, ist jedoch oft durch die Leistung der (regenerativen) Kältequelle begrenzt.

Geschlossene Kühldecken schließen eine Hinterlüftung der Kühlpaneele mit Raumluft aus, sie sollten auf der Oberseite gedämmt sein. Sie sind hygienisch und wärmephysiologisch optimal. **Offene Kühldecken** haben Schlitze zwischen den Paneelen oder nicht abgedeckte Perforationen in den Paneelen, so dass die Raumluft aufgrund des thermischen Auftriebs auch die Rückseiten der Kühlelemente beaufschlägt.

Die **spezifischen Kühlleistungen** liegen bei geschlossenen Decken bei max. **80 W/m²**, bei offenen Decken durch einen hohen konvektiven Anteil bei bis zu max. **120 W/m²**, dabei besteht jedoch bei einer Kühlleistung von über 100 W/m² Zuggefahr. Die Betriebstemperaturen betragen im Sommer üblicherweise 16 bis max. 20 °C bei einer Temperaturspreizung von 2 bis 3 K.

Eine Lüftungsanlage ist für den Einsatz einer Kühldecke bei solch tiefen Temperaturen und solch hoher Kühlleistung unerlässlich, um die Raumluftfeuchte zu begrenzen. Es wird von einem minimalen Luftvolumenstrom ausgegangen, um die hygienischen Bedingungen zu erfüllen und die anfallenden Feuchtelasten aus dem Raum abzuführen (relative Luftfeuchte sollte 50 % nicht übersteigen – Kondensationsgefahr!).

4 Kältequellen – Eignung und Dimensionierung

4.1 Erdsonde

Der Untergrund kann als Wärme- und Kältequelle sowie als thermischer Energiespeicher genutzt werden. Er ist wegen des großen erschließbaren Volumens und des nahezu gleichen Temperaturniveaus für viele Anwendungen im Niedertemperaturbereich gut geeignet.

Die Temperatur in den oberen Erdschichten bis zu einer Tiefe von ca. 10 m variiert jeweils zeitversetzt mit den Jahreszeiten entsprechend der Umgebungstemperatur, dabei kann die mittlere Temperatur im Erdreich ab 10 m Tiefe mit ca. 10 °C angenommen werden.

Hierbei können Wärmetauscher, z.B. konfektioniert als **Energiesonden** vertikal ins Erdreich eingebracht werden, das Ganze reicht dann bis in Tiefen von 70 bis 150 m (ab Tiefen > 100 m genehmigungspflichtig vom Bergbauamt). Damit sich die Sonden nicht gegenseitig beeinflussen, sollte ihr Abstand mindestens 10 % ihrer Tiefe sein.

Das Erdreich wird also als Kältespeicher benutzt, je nach Beschaffenheit des Erdreichs und der Grundwassersituation (Strömungsgeschwindigkeit) hat dieser Speicher eine bestimmte Kapazität, die nicht überschritten werden darf, da die Kältequelle Erdreich sonst zu warm wird. Das gilt sowohl für die tägliche (**Auslegungskriterium 1**) als auch für die jährliche (**Auslegungskriterium 2**) Kälteentnahme.

Der Speicher „regeneriert“ sich von selbst (d.h. kühlt sich in der Nacht / im Winter wieder ab), wenn das Grundwasser schneller als 0,5 m/d fließt.

Eine Nutzung ausschließlich zur Kühlung ist ebenso möglich, im anderen Falle muss der Erdreichspeicher im Winter wieder herunter gekühlt werden. Bei den tiefen, vertikalen Systemen geschieht dies sehr sinnvoll, indem diese Wärme im Winter zur Beheizung des Gebäudes genutzt wird. Tiefe Sonden erfüllen dies sehr gut, da etwa alle 30 m das Erdreich 1 K wärmer wird, in 100 m Tiefe also z.B. bereits 12 °C. Faustregel: je tiefer die Sonde, desto mehr eignet sich das System zum Heizen und desto weniger zum Kühlen. Heiz- und Kühlbedarf sollten in derselben Größenordnung liegen.

Mit einer Wärmepumpe kann das Aufheizen und Abkühlen des Erdreiches zusätzlich unterstützt werden.

Entscheidend für den Wärmeentzug ist die Wärmeleitfähigkeit des Bodens, seine Dichte und spezifische Wärmekapazität, je feuchter der Boden ist, desto günstiger ist dieser.

VDI 4640 [4] gibt die mögliche Entzugsleistung (für 1800 Betriebsstunden) abhängig von der Beschaffenheit des Untergrundes an:

- **Untergrund mit hohem Grundwasserfluss:** 100 W/m
- **Festgestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit:** 80 W/m
- **Festgestein mit normalem Untergrund:** 55 W/m
- **Schlechter Untergrund, trockene Sedimente:** 30 W/m

Die exakte Auslegung solcher Systeme ist sehr komplex und erfordert Fachwissen. Hier einige grobe Anhaltspunkte:

Auslegungskriterium 1 – tägliche Kälteentnahme:

Mit den vertikalen Sonden können pro Meter Sonde etwa **500 bis 700 Wh/d** Kälte ins Gebäude befördert werden.

Beispiel: Täglicher Kältebedarf des Gebäudes 210000 Wh/d. Planung mit Erdsonden, 50 m lang. Pro m Sonde können etwa 600 Wh/d Kälte geliefert werden. Das ergibt 210000 / 600 = 350 m Pfahl, also 7 Sonden à 50 m.

Auslegungskriterium 2 – jährliche Kälteentnahme:

Für die vertikalen Systeme hat der Kältespeicher Erdreich pro Meter Sonde eine Kapazität von **70 bis 90 kWh/(m a)**.

Beispiel: Jährlicher Kühlenergiebedarf des Gebäudes 11500 kWh/a. Jährliche Kapazität der geplanten Anlage 7 Sonden x 50 m x 80 kWh/(m a) = 28000 kWh/a – dies ist absolut ausreichend.

4.2 Energiepfahl, Schlitzwand

Bauwerke müssen bei schwierigen Baugrundbedingungen häufig tiefgegründet werden. Überall dort, wo eine Pfahlgründung erforderlich wird, bietet sich eine Überprüfung an, ob die zusätzliche geothermische Nutzung des Untergrunds durch Energiepfähle (geothermisch aktivierter Ort beton oder Fertigpfähle) möglich ist.

Energiepfähle nutzen das oberflächennahe geothermische Potential zum Heizen und/oder Kühlen. Nur wenn vorrangiger Wärmeentzug gegeben ist, wird tatsächlich die oberflächennahe Erdwärme (oberflächennahe Geothermie) genutzt. Bei wechselseitigem Kühl- und Heizbetrieb funktionieren Energiepfähle und das sie umgebende Erdreich als saisonaler Kälte und Wärmespeicher. Dann liegt streng genommen keine Nutzung der oberflächennahen Geothermie im Sinne eines dauerhaften Wärmeentzugs vor, sondern der Untergrund wird geothermisch genutzt.

Das Funktionsprinzip von Energiepfählen ist analog dem von Erdwärmesonden. Eine umschaltbare Wärmepumpe gibt die dem Gebäude entzogene Wärme an den Energiepfahlkreislauf ab (Kühlbetrieb). Die Kosten für die Herstellung des Wärmetauschers „Energiepfahl“ sind im Vergleich zur herkömmlichen Erdwärmesonde erfahrungsgemäß um ca. 40 bis 50 % geringer.

Energiepfahlanlagen erfordern eine optimale, den Untergrundverhältnissen angepasste Auslegung und Dimensionierung.

Neben der Wärmeleitung durch das Erdreich, bestimmen volumetrischer Wärmefluss (Wärmetransport) mit dem Grundwasser, Pfahlanordnung (u. a. gegenseitige Beeinflussung), konstruktive Merkmale (geothermische Aktivierung und Pfahlgeometrie) und Betriebsregime der Geoenergiezentrale die Leistungsfähigkeit von Energiepfählen.

Die spezifische Entzugsleistung von Energiepfählen/Schlitzwänden ist auch vom Durchmesser abhängig, dabei beträgt diese für [5]:

- **Energiepfahl, Ø 30 bis 50 cm:** **40 bis 60 W/lfm**
- **Energiepfahl, Ø > 60 cm:** **35 W/m² Mantelfläche**
- **Energieschlitzwand:** **30 W/m² Mantelfläche**

Der tägliche Kälteentzug für Energiepfähle bzw. Schlitzwände liegt bei etwa **500 bis 700 Wh/d lfm** [6].

Eine überlange Nutzungsdauer sowie ein einfacher Energiestrom (nur Kühlen oder Heizen) führen zu einer geringeren Entzugsleistung. Hingegen liefert eine vorhandene Grundwasserströmung sowie eine kombinierte Anwendung (Kühlen und Heizen) in Verbindung mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherfähigkeit des Bodens eine höhere Entzugsleistung.

Es sollte daher bereits bei den Voruntersuchungen die gesamte Klimakonzeption des Gebäudes berücksichtigt werden, wobei zu beachten ist, dass das System zum Heizen und Kühlen (Energiebilanz im Boden) genutzt wird und der Eintrag der Energie in das Gebäude über ein Niedrigtemperaturheizsystem, welches auch zum Kühlen geeignet ist, erfolgt.

Die Nutzungsdauer der „direkten Kühlung“ ist beschränkt, wenn kein fließendes Grundwasser vorhanden ist, da beim Erreichen einer Bodentemperatur von 19 °C die Absorptions-/Trägerflüssigkeit nicht mehr ausreichend gekühlt wird. Mittels Kältemaschine/Wärmepumpe kann das System weiter betrieben werden, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Wärme der Antriebsenergie in den Boden abgeführt werden muss.

4.3 Grundwasser

Die Verwendung von Grundwasser für Kühlzwecke ist aufgrund seines nutzbaren Temperaturniveaus eines der wirkungsvollsten Kältequellen. So kann man mit einem **mittleren Grundwasser-Jahrestemperaturniveau** von **10 bis 12 °C** rechnen. Aufgrund des sehr tiefen nutzbaren Temperaturniveaus des Grundwassers (mittlere Vorlauftemperaturen von 12 °C möglich) ist eine Reduktion von Kühlflächensystemen möglich.

Hier ist zuerst zu prüfen, ob Wasser in ausreichender Menge und Fließgeschwindigkeit (das aufgewärmte Wasser muss abfließen und neues, kaltes Wasser nachströmen können) verfügbar ist. Ist das Wasser nicht kalt genug, muss eine Wärmepumpe dazwischen geschaltet werden. Des Weiteren muss eine grundwasserrechtliche Genehmigung vorhanden sein und es darf zu keiner Durchmischung von angesaugtem und rückgeführten Grundwasser kommen (Saug- bzw. Schluckbrunnen nötig). Ebenfalls ist eine Aufheizung des Grundwassers zu vermeiden, dies ist im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzuklären. Bei der Nutzung von Grundwasser als Kältequelle ist noch zu prüfen, ob in der näheren Umgebung bereits das Grundwasser zu Kühlzwecken genutzt wird. Dies kann insbesondere in Innenstadtbereichen zu einer Aufheizung des Grundwasserleiters führen. Nicht selten steigt, bei vermehrter lokaler Nutzung, das Temperaturniveau auf 20 °C an.

Das Grundwasser kann direkt über einen Wärmetauscher bei Niedertemperatursystemen genutzt werden, etwaige Spitzenlasten können über eine Wärmepumpe abgefangen werden. Bei einem Durchsatz von einem **Kubikmeter Grundwasser** pro Stunde kann eine **Kühlleistung von ca. 4,5 kW** erwartet werden (gültig für einen ΔT von 4 Kelvin). Dies würde für eine Bürofläche von ca. 83 m², gekühlt mit TAB, ausreichen (spezifische Auslegung von 12 l/h m²).

4.4 Trocken- und Nasskühlturm (freie Kühlung)

Trockenkühlturm

Kühlturm zur Rückkühlung von Wasser, bei dem kein direkter Kontakt zwischen dem zu kühlenden Wasser und dem Kühlmedium Luft besteht. Das erwärmte Wasser wird, ähnlich wie in einem Kraftfahrzeugkühler, von Luft gekühlt und wieder über einen Wärmetauscher zu den TABs bzw. Kühldecken geleitet. Der zur Kühlung erforderliche Luftzug wird durch Ventilatoren gewährleistet.

Nasskühlturm (Hybrider Kühlturm)

Kühlturm zur Rückkühlung von Wasser, bei dem das zu kühlende Wasser mit der Kühlluft in direkten Kontakt kommt und durch Verdunstung und Erwärmung der Luft an diese Wärme abgibt. Der zur Kühlung erforderliche Luftzug wird durch Ventilatoren sichergestellt.

Dabei wird der Wärmetauscher auf der Luftseite durch einen sekundären Wasserkreislauf besprüht. Durch die Verdunstung des Wassers kann einerseits die Wärmetauscherfläche reduziert werden und andererseits kann anstelle der Außenluft- die Feuchtkugeltemperatur ausgenutzt werden.

Eine seit Jahrtausenden verwendete Methode zur Kühlung ist die Verdunstung von Wasser. Neben der direkten Nutzung der Verdunstungskühlung im Klimazentralgerät kann die Verdunstungskühlung auch indirekt über Kühltürme genutzt werden. Hier ist jedoch zu beachten, dass bei diesen Systemen insbesondere im Sommer in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit der Luft (ausgedrückt über die Feuchtkugeltemperatur) für die Nutzung zur Kühlung nur vergleichsweise hohe Kühlwassertemperaturen erreicht werden. Je höher die relative Luftfeuchte der Luft, desto schlechter funktioniert die Verdunstung. Für die Nutzung mit freier Kühlung ist eine Systemtemperatur von oberhalb 18 °C zu erzielen.

Mit einem **hybriden Kühlturm** erreicht man in der Praxis **Kühlwassertemperaturen etwa 2 bis 4 K über der Feuchtkugeltemperatur**. In München rechnet man zum Beispiel mit einer maximalen Feuchtkugeltemperatur von 21 °C, was eine Kühlwassertemperatur von 25 °C zur Folge hätte. Dies bedeutet, dass diese Systeme in heißen und feuchten Sommern vorwiegend in der Nacht betrieben werden sollten, damit eine ausreichend tiefe Kühlwassertemperatur erreicht wird. Deshalb eignen sich vorwiegend speichernde Systeme wie die Bauteilaktivierung für die Nutzung der freien Kühlung.

4.5 Kältemaschine

Reicht das Temperaturniveau des aus dem Erdreich/Grundwasser strömenden Trägermediums nicht aus, um die erforderliche Kühlaufgabe zu übernehmen, dann kann das Erdreich/Grundwasser als Wärmesenke für eine Kältemaschine verwendet werden. Dies ist zum Beispiel dann notwendig, wenn die Zuluft des Gebäudes für die Klimatisierungsaufgabe entfeuchtet werden muss. Die notwendige Kaltwassertemperatur für die Entfeuchtung beträgt dann ca. 6 bis 8 °C und dies steht im Erdreich/Grundwasser nicht zur Verfügung.

Der elektrische Energiebedarf für den Betrieb der Kältemaschine sinkt mit steigender Temperatur im Kondensatorkreis. Bei wassergekühlten Kältemaschinen ist eine Rückkühlung über die Außenluft üblich (nasse oder trockene Kühltürme). Die Systemtemperaturen im Rückkühlkreis liegen damit in der Praxis zwischen 25 °C und 40 °C. Nutzt man die Wärmesenke Erdreich/Grundwasser, dann kann man mit geeigneten Kältemaschinen die Systemtemperaturen im Rückkühlkreis absenken. Damit steigt die Leistung der Kältemaschine, und der elektrische Energiebedarf sinkt. Oft kann auf einen zusätzlichen Kühlturm ganz verzichtet werden.

4.6 Wärmepumpe

Einige Wärmepumpen können auch zum Kühlen eines Gebäudes eingesetzt werden. Dabei kann zwischen zwei unterschiedlichen Methoden der Kühlung differenziert werden:

- **Mechanische Kühlung:** Die Funktionsweise der Wärmepumpe wird umgekehrt, sodass diese wie ein Kühlschrank arbeitet. Häufig wird diese Kühlung auch als „reversibler“ Betrieb der Wärmepumpe bezeichnet.
- **Direkte Kühlung:** Die Soleflüssigkeit bzw. das Grundwasser nehmen über einen Wärmetauscher die Wärme aus dem Kühlkreis auf und führen diese nach außen ab. Bei dieser auch als „Natural Cooling“ bezeichneten Funktion ist die Wärmepumpe bis auf die Regelung und Umwälzpumpen ausgeschaltet.

"Natural Cooling"

Generell sind im Sommer die Temperaturen im Inneren eines Gebäudes höher als im Erdreich oder im Grundwasser. Dadurch kann das Erdreich oder das Grundwasser zur natürlichen Kühlung des Gebäudeinneren genutzt werden. Aufgrund der hohen Außenlufttemperaturen im Sommer kann keine Luftwärmepumpe für das "Natural Cooling" eingesetzt werden. Generell ist die Kühlfunktion in Ihrer Leistungsfähigkeit nicht mit einer Vollklimatisierung zu vergleichen. Die Kühlleistung ist hier abhängig von der Wärmequellegröße und der Wärmequellentemperatur. Da diese Faktoren von der Jahreszeit abhängig sind, hat z.B. das Erdreich am Ende des Sommers mehr Wärme gespeichert und dadurch nimmt die Kühlleistung ab. "Natural Cooling" ist besonders energiesparend und kostengünstig für die Gebäudekühlung, da nur ein sehr geringer Stromverbrauch benötigt wird. Die Wärmepumpe geht nur für die Trinkwassererwärmung in Betrieb.

Zur direkten Kühlung der Räume können folgende Niedertemperatur-Systeme angeschlossen werden:

- Gebläsekonvektoren
- Kühldecken
- Fußbodenheizungen
- Bauteilaktivierung (BKT)
- Kapillarrohmatten

5 Überblick Kühlsysteme und Kältequellen

In Tabelle 6 werden die vorgestellten Kühlsysteme und Kältequellen tabellarisch gegenübergestellt. Generell sollte bei der Erfordernis einer zusätzlichen Kältequelle immer dem System der Wärmepumpe den Vorzug gegeben werden, da dieses System auch zu Heizzwecken verwendet werden kann.

Tabelle 7 gibt einen Überblick zwischen den anfallenden Wärmelasten, Speichermassen und den Kühlsystemen.

Tabelle 6: Kühlsysteme in Gebäuden – Systeme und Voraussetzungen

Kap.	Kühlsystem	zusätzliche Kältequelle	Verhalten	zuführbare Kälteenergie [Wh/m²d]	Index
	Natürliche Lüftung				
3.1	nur tags	-	träge	30	1)
3.1	auch nachts	-	träge	150	
	Mechanische Lüftung, nachts erhöht				2)
3.2	über Außenluft	-	träge	200	
3.2.1	über Außenluft und Luft-Erdreichwärmetauscher	-	träge	250	3)
	Mechanische Lüftung				
	über kaltes Wasser < 20 °C	-	träge-flink	300	4)
4.3	über kaltes Wasser > 20 °C	Wärmepumpe/ Kältemaschine	träge-flink	300	
3.4 3.5	Betonkernaktivierung (tabs)				5)
4.2	über Energiepfahl	-	träge	200	6)
4.2	über Energiepfahl	Wärmepumpe/ Kältemaschine	träge	250	6)
4.1	über Energiesonde	-	träge	200	
4.1	über Energiesonde	Wärmepumpe/ Kältemaschine	träge	250	
4.3 4.5 4.6	über kaltes Wasser	-	träge	250	
4.4	über Nachtluft (Kühlturm)	-	träge	250	
3.6	Kühldecke				
4.2	über Energiepfahl	Wärmepumpe/ Kältemaschine	träge-flink	300	6)
4.1	über Energiesonde	Wärmepumpe/ Kältemaschine	träge-flink	300	
4.3 4.5 4.6	über kaltes Wasser	Wärmepumpe/ Kältemaschine	flink	900	

Erläuterungen zur Tabelle 6:

- 1) unbefriedigend
- 2) Lüftungsanlage kann im Winter zur Wärmerückgewinnung genutzt werden
- 3) Nutzung auch zur Vorerwärmung der Luft im Winter
- 4) Wasser muss kalt genug sein
- 5) Decke (tabs-Bauteil) kann im Winter auch zur Beheizung dienen
Um ein flinkes System zu erhalten, wird die Kombination mit einer mechanischen Lüftung empfohlen.
- 6) Bei Pfahlgründung



6 Literatur

- [1] *Thermische Behaglichkeit – Komfort in Gebäuden.* Dokumentation Primero-Komfort.
- [2] *VDI 2078 Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume.* Beuth Verlag. 07-1996. Berlin
- [3] *SIA Merkblatt 2021- Gebäude mit hohem Glasanteil – Behaglichkeit und Energieeffizienz.* Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein –SIA. 2002. Zürich.
- [4] *VDI 4640-1 Thermische Nutzung des Untergrundes - Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte.* Beuth Verlag. 12-2000. Berlin
- [5] *Thermoaktive Fundamente.* Herstellerunterlage Firma enercret. 2002
- [6] Zimmermann, M. *Handbuch der passiven Raumkühlung.* EMPA ZEN. ISBN 3-905594-06-4. 1999