



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 18. Dezember 2009

Hocheffiziente Kühlsysteme für Gebäudesanierungen

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Energie in Gebäuden
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

ewz Stromsparfonds, CH-8050 Zürich
Amt für Umwelt und Energie, Basel-Stadt, CH-4051 Basel

Auftragnehmer:

Basler & Hofmann AG, Ingenieure und Planer
Forchstrasse 395
CH-8032 Zürich
www.bhz.ch

Autoren:

Petra Benz-Karlström, petra.benz@bhz.ch
Alex Primas,
Martin Hagel,
Cordula Müller-Platz

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns

BFE-Programmleiter: Charles Filleux

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 151718 / 101464

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Herzlichen Dank an die Begleitgruppe für die konstruktive Zusammenarbeit:

Charles Filleux, BFE

Michael Thommen, AUE Basel-Stadt

Jörg Ruosch, ewz

Beat Wellig, Hochschule Luzern, Technik und Architektur

Besten Dank auch an die folgenden Unternehmen für die gelieferten Unterlagen

Brunner Haustechnik AG, Wallisellen; Durrer Technik AG, Adligenswil; Eberhard und Partner AG, Aarau; Kiefer Luft- und Klimatechnik, Stuttgart, DE; Kampmann GmbH, Lingen (Ems), DE; Mountair AG, Kreuzlingen; Munters AG, Zürich; MWH Barcol-Air AG, Stäfa; Rabtherm AG, Zürich; Scheco AG, Winterthur; Tobler System AG, Urdorf; Trox Technik, Rüti, WT Wärmeaustausch Technologien AG, Tentlingen; York Schweiz, Bassersdorf

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------|---|----|
| 1 | Ausgangslage | 6 |
| 2 | Ziel der Arbeit..... | 6 |
| 3 | Vorgehen..... | 6 |
| 3.1 | Systemauswahl und Berechnung Kennzahlen Abgabesysteme | 7 |
| 3.2 | Systemauswahl und Berechnung Kennzahlen Erzeugersysteme..... | 8 |
| 3.3 | Analyse über die Auswirkung der Baulichen Integrierbarkeit auf die einsetzbarkeit von raumkühl- und kälteerzeugersystemen | 8 |
| 3.4 | Betrachtete Systeme..... | 8 |
| 4 | Entscheidungshilfe | 10 |
| 4.1 | Empfehlung Lüftung..... | 10 |
| 4.2 | Abgabesysteme | 10 |
| 4.3 | Erzeugersysteme | 22 |
| 5 | Kriterien zur Weiternutzung bestehender Verteilsysteme..... | 37 |
| 6 | Gebäudetypisierung | 38 |
| 6.1 | Kühlleistungsbedarf der jeweiligen Gebäudetypen | 47 |
| 7 | Messungen Basler & Hofmann Rehalp | 50 |
| 7.1 | Funktionsweise Abgabesystem | 50 |
| 7.2 | Funktionsweise Erzeugersystem | 51 |
| 7.3 | Durchgeführte Messungen | 51 |
| 8 | Diskussion und Schlussfolgerungen | 57 |
| 9 | Referenzen..... | 59 |
| 10 | Anhang 1 | 60 |
| 10.1 | Berechnungshintergrund Abgabesysteme..... | 60 |
| 10.2 | Referenzraum..... | 60 |
| 10.3 | Hilfsenergieberechnung | 60 |
| 10.4 | Optimiertes Brüstungsgerät | 62 |
| 11 | Anhang 2 | 63 |
| 11.1 | Berechnungsgrundlage Erzeugersysteme | 63 |
| 12 | Anhang 3 | 64 |
| 12.1 | Messungen Basler & Hofmann Rehalp | 64 |

Zusammenfassung

Die Belüftung und Kühlung von Gebäuden machen einen immer grösseren Teil des schweizerischen Gesamtenergieverbrauchs aus. Wenn wir nichts verändern und "Business as usual" betreiben, steigert sich dieser Verbrauch bis 2035 auf 2.9 TWh/a [1]. Der Grund dieses wachsenden Energieverbrauchs liegt unter anderem in steigenden Nutzeransprüchen. In Kombination mit steigenden Aussenlufttemperaturen werden wir in Zukunft häufig auf eine Gebäudekühlung nicht verzichten können. Unsere Aufgabe ist es, mit möglichst geringem Energieaufwand ein komfortables Klima in den Räumen zu schaffen.

Die vorliegende Studie geht auf die speziellen Bedürfnisse bei der Sanierung von Dienstleistungsgebäuden ein und gibt einen Überblick über die am Markt erhältlichen effizienten Kühlsysteme für Raumkühlung geben. Da man sich bei der Optimierung der Gebäudekühlung nicht nur auf die Gebäudetechnik beschränken darf, muss das Zusammenwirken von Gebäudehülle, Gebäudenutzung und Gebäudetechnik berücksichtigt werden.

Bauliche Voraussetzungen Die bauliche Voraussetzungen stellen, speziell im Fall von Sanierungen, die Rahmenbedingungen für die einzusetzende Systeme. Aus diesem Grund wurde eine Typisierung der häufig vorkommenden sanierungsbedürftigen Gebäude im Dienstleistungsbereich durchgeführt. Typisiertungskriterien sind vor allem die bauliche Ausbildung der Decken, das Vorhandensein eines Doppelbodens und das Vorhandensein von „massiven“ Brüstungen. Die Ergebnisse ist im Entscheidungshilfe für Abgabesysteme eingeflossen.

Systemauswahl Das erste Kriterium bei der Systemauswahl war, dass die Systeme, Abgabe- sowohl als Erzeugersysteme, für Sanierungen geeignet sein sollen. Sie sollten zum Zeitpunkt der Studie auf dem Markt erhältlich sein und sich durch Wirtschaftlichkeit auszeichnen. Aus Effizienzgründen werden bei den Abgabesystemen nur reine Wasser- sowie Luft/Wassersysteme betrachtet.

Es wurden nur Systeme berücksichtigt welche mit mindestens 18°C Wasservorlauftemperatur im Raum betrieben werden oder eine solche produzieren können. Dieses Kriterium wurde gesetzt, um einen grösstmöglichen Anteil an Freecooling zu erreichen.

Um eine Vergleichsbasis der Abgabesysteme zu bilden, wurde ein Referenzraum definiert Auslegungskriterien für die Erzeugung wurden festgelegt. Diese Vorgaben wurden den Herstellern zugesellt, die sich dazu bereit erklärt hatten die Studie zu unterstützen.

Folgende Systeme wurden betrachtet:

| Abgabesysteme | Vergleichsparameter |
|--|--|
| Kapillarrohrkühldecken | Effizienz (kWh Kälte / kWh Strom) |
| Metallkühldecke | Flächenbedarf (m ²) |
| Gipskühldecke | Investitionskosten (Fr/m ² gekühlte Bodenfläche) (bei optimalen baulichen Voraussetzungen) |
| Kühlsegel | Betriebskosten (Fr/m ² gekühlte Bodenfläche) |
| Optimiertes Brüstungsgerät | Bauliche Integrierbarkeit |
| Kühlbalken Aktiv | Vorteile |
| Kühldecke mit Einbindung der Deckenmasse | Nachteile |

Tabelle 1 Betrachtete Abgabesysteme und Vergleichsparameter

| <i>Erzeugersysteme</i> | <i>Vergleichsparameter</i> |
|------------------------------------|--|
| Absorptionskältemaschine Fernwärme | Effizienz (kWh Kälte / kWh Strom) |
| Grundwasserkühlung | Investitionskosten (Fr/m ² Nutzfläche) (bei optimalen baulichen Voraussetzungen) |
| Seewasserkühlung | Betriebskosten (Fr/m ² Nutzfläche) |
| Abwasserkühlung | Bauliche Integrierbarkeit / Voraussetzungen für Verwendung |
| Flusswasserkühlung | Vorteile |
| Erdsondenkühlung | Nachteile |
| Freecooling mit Aussenluft | |
| Kompressionskältemaschine | |
| Sorptionsgestützte Klimatisierung | |

Tabelle 2 Betrachtete Erzeugersysteme und Vergleichsparameter

Entscheidungshilfe Eine Entscheidungshilfe wurde entwickelt um die Systemauswahl zu erleichtern. Dieses Werkzeug wurde in einer Broschüre für Bauherren und Architekten zusammengestellt so dass sie informierter in die Diskussion mit Planern eingehen können. Die Broschüre kann unter <http://www.bundespublikationen.admin.ch> bezogen werden.

Messungen Als Beispiel eines effizienten und für Sanierungen geeigneten Kühlsystems, wurde das bei Basler & Hofmann AG Zürich installierte System ausgewertet. Die Kälteerzeugung besteht aus einem neuartigen Verdunstungskühler, der für Spitzenleistungen von einer Kältemaschine unterstützt wird. Für die Energieabgabe im Raum sorgen optimierte Brüstungsgeräte. Für die Messperiode wurde durch den hohen Anteil an Freecooling im Betrieb für das Gesamtsystem eine Arbeitszahl von etwa 10 erreicht. Für die Kälteerzeugung alleine (Kältemaschine, Rückkübler) liegt die Arbeitszahl bei einem Wert von 18.

Empfehlung Lüftung Die hohe Vorlauftemperatur bei der Raumkühlung hat nicht nur den Vorteil, dass ein solches System energieeffizienter ist und ein behaglicheres Innenraumklima bewirkt als Systeme mit tiefen Kühltemperaturen, auch kann bei schweizerischen Klimaverhältnissen häufig auf eine Kühlbatterie bei der Zuluftaufbereitung verzichtet werden. Wenn die Zuluftmenge auf die hygienisch notwendige Luftmenge begrenzt ist, reicht die Kälterückgewinnung von der Abluft aus um die Zuluft auf ein ausreichend tiefes Temperaturniveau zu konditionieren. Die Unterkühlung der Zuluft um Wasserausscheidung zu bewirken ist nicht mehr notwendig, da aufgrund der hohen Vorlauftemperatur bei der Raumkühlung im Raum die Kondensatgefahr sehr gering ist. Da die Feuchte im Raum jedoch unkontrolliert ist, muss eine grössere Bandbreite für den Komfortbereich toleriert werden. Es wird empfohlen, wenn möglich auf eine Kühlbatterie bei der Zuluftaufbereitung zu verzichten. So können nicht nur die Investitionskosten für die Zuluftaufbereitung verringert werden, auf die Produktion von Kälte mit tieferen Temperaturen einzige für Luftkühlung kann ebenfalls verzichtet werden.

Abstract

Ventilation and cooling of buildings constitute a constantly increasing part of Switzerland's total energy consumption. If we continue with business as usual, the consumption will increase to 2.9 TWh/a in the year 2035 [1]. One of the reasons for the augmentation in energy consumption, are increasing user demands. In combination with increasing ambient air temperatures, cooling of buildings will become a necessity. It is our task to create a comfortable indoor climate with the least use of energy.

This study addresses the particular requirements concerning building retrofit and presents an overview of efficient cooling systems for buildings that are available on the market. When optimising the cooling system of a building, it is important to consider the interaction between the building envelope, the use of the building and the building services systems.

Structural preconditions The structural design creates, especially in the case of building retrofit, the framework for the systems to be used. For this reason, a typification of the common types of office buildings in need of a retrofit was performed. The criteria for the typification are, above all, the construction of the ceilings, the existence of a raised floor and the existence of massive window parapets. The results of the typification are incorporated in the decision tool for emission systems.

Selection of systems The primary criterion for the systems was that the emission as well as generation systems should be suitable for building retrofit. They should be available on the market at the time of the study and they should be cost-effective. For energy efficiency reasons, only systems with water or air in combination with water as cooling media were analysed.

The systems had to be able to function with or produce water with an emission temperature of minimum 18°C. This precondition ensures a high percentage of free cooling.

To ensure the comparability of the systems, a reference office room was created and preconditions for the generation systems were defined. This framework was sent to producers who had declared themselves willing to support the study.

The following systems were considered:

| Emission systems | Characteristics |
|--|--|
| Gypsum cooling ceiling with capillary tubes | Efficiency (kWh emitted cooling energy / kWh Electricity) |
| Metal cooling panels | Required space (m ²) |
| Gypsum cooling ceiling | Investment costs (Fr/m ² conditioned floor area) (at ideal structural conditions) |
| Free hanging cooling panels | Operation costs (Fr/m ² conditioned floor area) |
| Convection unit below window | Flexibility for different kinds of structural designs |
| Fan coil | Advantages |
| Cooling panel which activates the ceiling mass | Disadvantages |

Table 1 Analysed emission systems and characteristics

| <i>Generation systems / sources</i> | <i>Characteristics</i> |
|--|---|
| Absorption refrigeration with district heating | Efficiency (kWh generated cooling energy / kWh Electricity) |
| Ground water | Investment costs (Fr/m ² conditioned floor area) (at ideal structural conditions) |
| Lake water | Operation costs (Fr/m ² conditioned floor area) |
| Waste water | Flexibility for different kinds of structural designs |
| River water | Advantages |
| Geothermal energy | Disadvantages |
| Freecooling with ambient air | |
| Compression chiller | |
| Desiccant cooling | |

Table 2 Analysed generation systems / sources and characteristics.

Desicion tool A desicion tool was developed to facilitate the system choice. This tool is published in a brochure for archiects and building owners and shall serve as an instrument in the discussion with building services designers. The brochure can be obatained at <http://www.bundespublikationen.admin.ch>.

Monitoring As an example of an efficient cooling system suitable for building retrofit, the system installed at Basler & Hofmann AG, Zürich was monitored and evaluated. The generation system consists of an evaporative cooler as well as a compression chiller for peak loads. The emission system is an optimised convector placed under the windows. For the total system a performance index of 10 for the period of monitoring could be achieved. For the generation system alone, a performance index of 18 could be achieved for the same period.

Recommendation for ventilation The advantages of high emission temperatures for cooling are that the system is more energy efficient than systems with lower temperatures and it creates a more comfortable indoor climate. In addition, in Swiss climate conditions, the cooling coils in the air handling unit can often be omitted. When the supply air flow is limited to the hygienic air flow, the cooling energy recovery from the exhaust air is enough to condition the supply air. The supercooling of the supply air in the air handling unit with the goal of extracting water from the supply air, is no longer needed. The emission temperature in the room cooling units is high enough to prevent the forming of condensation water. When the cooling coils in the air handling unit are omitted, the moisture content in the supply air is unregulated. Consequently the users must be able to accept larger variation in air humidity than in traditional systems. It is recommended to omit the cooling coils in the air handling units where possible. Thus the investment costs are reduced and the generation of cold water with low temperature solely for the conditioning of supply air is not necessary.

1 Ausgangslage

Die Belüftung und Kühlung von Gebäuden machen einen immer grösseren Teil des schweizerischen Gesamtenergieverbrauchs aus. Gemäss [1] betrug der Elektrizitätsverbrauch für einfache Raumlüftung und -kühlung im Jahr 2005 1 TWh. Wenn wir nichts verändern und "Business as usual" betreiben, steigert sich dieser Verbrauch bis 2035 auf 2.9 TWh/a [1]. Der Grund dieses wachsenden Energieverbrauchs liegt unter anderem in höheren Nutzeransprüchen. Der Gebäudebenutzer ist nicht mehr bereit, seine Kleidung an die Jahreszeit anzupassen, und ist durch die Arbeit vor dem Computer auch empfindlicher für Variationen im Innenraumklima. Zusätzlich haben Studien [2] gezeigt, dass die Produktivität am Arbeitsplatz (geistiges Leistungsvermögen) stark mit der Raumtemperatur zusammenhängt, was immer mehr anerkannt wird. Mit diesen Voraussetzungen und in Kombination mit steigenden Aussenlufttemperaturen werden wir in Zukunft häufig auf eine Gebäudekühlung nicht verzichten können. Unsere Aufgabe ist es, mit möglichst geringem Energieaufwand ein komfortables Klima in den Räumen zu schaffen.

Bei Neubauten lassen sich die optimalen Bedingungen für ein energieeffizientes Kühlen durch kluge Ingenieur- und Architektenarbeit gut realisieren. Bei bestehenden Gebäuden müssen die vorhandene Gebäudestruktur und das eventuell bereits bestehende Kühlsystem in das Konzept miteinbezogen werden, um eine wirtschaftliche und energieeffiziente Lösung zu finden. Die Ausgangslage variiert; einige Gebäude haben vor der Sanierung noch keine Raumkühlung, andere z.B. wie bei vielen Bauten der 1960er und 1970er Jahre, sind mit ineffizienten 4-Leiter Klima-Konvektoren ausgerüstet. Eine gute Lösung zu finden ist komplexe Arbeit.

In den letzten Jahren ist einiges im Bereich Energieeffizienz und Raumkühlung geschehen. Viel gute Technik ist vorhanden und mit der neusten Ausgabe von SIA 382/1 werden auch konkrete Anforderungen an die Leistungszahlen von Kälteanlagen inkl. Rückkühlung im Voll- und Teillastbetrieb gestellt [3]. Leider werden aber häufig immer noch konventionelle Systeme geplant und das Potential der verfügbaren Technik wird nicht ausgenutzt, obwohl den Planern reichlich Information zur Verfügung steht, z.B. [6] oder [7].

2 Ziel der Arbeit

Projektziel ist es, durch Aufzeigen von Systemlösungen sowie deren Integration im Rahmen von Sanierungen, der Verbreitung effizienter Kühlösungen gegenüber konventionellen Lösungen mit handelsüblichen Kältemaschinen Vorschub zu leisten. Im Einzelnen wurden folgende Teilziele verfolgt:

- Analyse der derzeit auf dem Markt erhältlichen innovativen Kühlsystemen
- Erstellen einer Anwendungsmatrix mit einer Bewertung der Systemeigenschaften (Eigenschaften, Kosten, Anwendungsmöglichkeiten)
- Aufzeigen der Systemintegration bei Sanierung an konkreten Beispielen sowie durch Berechnungen
- Umsetzung der Resultate in einer Informationsbroschüre für Bauherren und Architekten

Die Informationsbroschüre soll dazu dienen, die Bestellerkompetenz bei Bauherren und Architekten zu erhöhen. So sollen sie informierter in den Diskussionen mit Planern eintreten können und diese dazu stimulieren effizientere Lösungen zu bringen.

3 Vorgehen

Die vorliegende Studie geht auf die speziellen Bedingungen bei der Sanierung von Dienstleistungsgebäuden ein und soll einen Überblick über die am Markt erhältlichen effizienten Kühlsysteme für Raumkühlung geben. Grosser Wert wird auf die Verbreitung der Ergebnisse gelegt, weshalb eine Broschüre für Bauherren und Architekten zusammengestellt wird. Darin werden Kälteabgabekühlungs- und -Erzeugersysteme verglichen. Eine Entscheidungshilfe erleichtert die Auswahl. Durch die Broschüre erhalten Architekten und Bauherren ein Werkzeug, um informierter in die Diskussionen mit den Planern gehen zu können.

Jedes bestehende Gebäude ist unterschiedlich. Die Voraussetzungen für eine Kühlung und die Einsatzbarkeit der verschiedenen Kühlsysteme sind sehr von der bestehenden Architektur abhängig. Deshalb kann ein Vergleich verschiedener Kühlsysteme nicht allgemeingültig sein. Einen solchen

Anspruch hat die Studie auch nicht. Es werden verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt, um ein energieeffizientes Kühlen zu erreichen. Die Randbedingungen im konkreten Fall entscheiden, welches Kühlssystem sich am besten eignet.

3.1 SYSTEMAUSWAHL UND BERECHNUNG KENNZAHLEN ABGABESYSTEME

Das erste Kriterium bei der Systemauswahl war, dass die Systeme für Sanierungen geeignet sein sollen. Sie sollten zum Zeitpunkt der Studie auf dem Markt erhältlich sein und Wirtschaftlichkeit aufzeigen. Auf reine Luftkühlssysteme wurde verzichtet, da diese Art von Raumkühlung sehr energieintensiv ist. Stattdessen wurden Wasser- und Luft/Wassersysteme betrachtet.

Bei den energetischen Vorgaben bei der Auswahl der Abgabesysteme wurde darauf geachtet, dass diese mit einer Wasservorlauftemperatur von 18°C betrieben werden können. Dieses Kriterium wurde gesetzt, um ein so grossen Anteil Freecooling wie möglich zu erreichen. Eine mechanische hygienische Belüftung wurde vorausgesetzt. Da eine Nachtauskühlung bei einer Sanierung aufgrund einer eventuell nicht ausreichenden Gebäudemasse nicht vorausgesetzt werden kann, wurde sie nicht in den Berechnungen berücksichtigt. Die zwei Abgabesysteme, die für ihre Funktion Gebäudemasse benötigen, wurden separat behandelt.

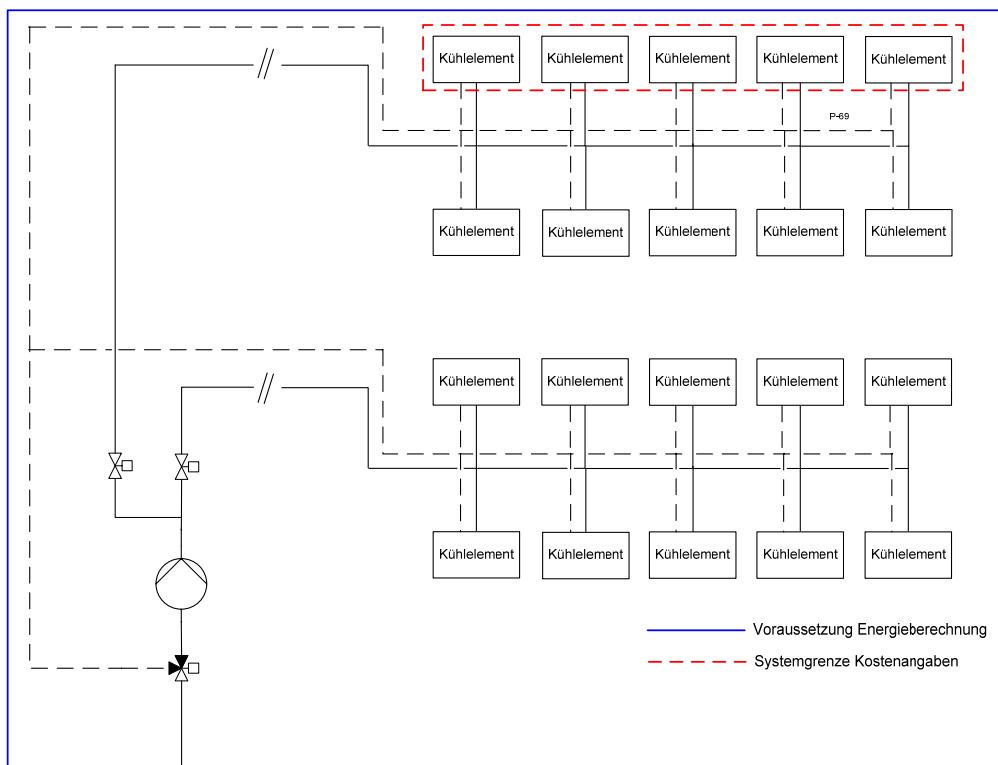
Um eine Vergleichsbasis der Abgabesysteme zu ermöglichen, wurde ein Referenzraum definiert, mit Sollraumtemperatur und Vor- und Rücklauftemperaturen des Wassers (siehe Anhang 1)

Diese Angaben wurden Herstellern von Abgabesystemen zugestellt, die sich dazu bereit erklärt hatten die Studie zu unterstützen. Auf Basis der Auslegedaten des Herstellers wurde die Hilfsenergie berechnet.

Es wurde von gem. [3] erforderliche Mindest-Wärmespeicherfähigkeit von 30 Wh/m² ausgegangen. Systeme, die für ihre Funktion eine höhere Wärmespeicherfähigkeit oder an Speicherfähigkeit einer gewissen Bauteil (z.B. Decke) abhängig ist, wurden separat behandelt.

Manche Luft/Wasser-Systeme benötigen einen höheren Luftwechsel als vorgeschrieben, um die geforderte Kühlleistung bei diesen Vorgaben zu gewährleisten. Die Förderenergie der zusätzlichen Luftmenge wird in diesem Fall in den Energieaufwand für die Systeme eingerechnet.

Die Systemgrenze für die Energieverbrauchsberechnung wurde gemäss Figur 1 gesetzt. Um eine fiktive Pumpenauslegung zu ermöglichen, wurden 20 Referenzräume auf zwei Stränge verteilt für eine Verteilpumpe angenommen.



Figur 1: Abgabesysteme: Systemgrenze für Energieverbrauchsberechnung

3.2 SYSTEMAUSWAHL UND BERECHNUNG KENNZAHLEN ERZEUGERSYSTEME

Auch bei den Erzeugersystemen war die Möglichkeit 18°C Kaltwasser zu produzieren als Kriterium für die Systemauswahl gesetzt. Focus wurde darauf gelegt, möglichst viel Freecooling benutzen zu können, sei es durch Abwärme von allfälligen internen Prozessen oder verfügbare Wärmesensenken wie z.B. Seewasser. Die Kältemaschine wurde in Verbindung mit der Rückkühlung ausgewertet, da die Abstimmung zwischen diesen beiden Komponenten das A und O für einen energieeffizienten Betrieb ist. Die Kosten wurden teilweise aus Herstellerangaben gezogen, teilweise aus internen Erfahrungswerten. Bei den Investitionskosten wurden einzig die Anlagenkosten betrachtet, vom Erzeuger bis zum Kälteverteiler. Einige Erzeugersysteme sind für sehr grosse oder sehr kleine Leistungen nicht geeignet. Deshalb wurden drei Gebäudegrößen von 2500 m², 8500 m² und 22000 m² gekühlte Fläche analysiert. Die entsprechenden Leistungsgrößen wurden 75 kW, 255 kW und 660 kW gewählt.

Als Alternative zu einem traditionellen Lüftungssystem wurde die sorptionsgekühlte Klimatisierung (SGK / DEC) aufgezeigt.

3.3 ANALYSE ÜBER DIE AUSWIRKUNG DER BAULICHEN INTEGRIERBARKEIT AUF DIE EINSETZBARKEIT VON RAUMKÜHL- UND KÄLTEERZEUGERSYSTEMEN

Die üblichen Sanierungszyklen der Gebäudehülle liegen bei 40-50 Jahren, die der Haustechnik bei 15-20 Jahren. Aufgrund dieser Sanierungszyklen wurden Büro- und Verwaltungsgebäude betrachtet, deren Baujahr zwischen Anfang der 1950er und Mitte 1990er Jahre liegt. Auch wenn im Laufe des Lebenszyklus' eines Gebäudes schon Teilerneuerungen, wie beispielsweise an der Gebäudetechnik, durchgeführt wurden, so besteht dennoch ein erheblicher Sanierungsbedarf in Bezug auf energieeffiziente Gebäudekühlung. Da man sich bei der Optimierung der Gebäudekühlung nicht nur auf die Gebäudetechnik beschränken darf, muss man das Zusammenwirken von Gebäudehülle, Gebäudenutzung und Gebäudetechnik berücksichtigen. Aus diesen Anforderungen ergeben sich verschiedene Typisierungskriterien, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten dieser Untersuchung Beachtung finden. Die Bestandsgebäude wurden zunächst in verschiedene Grundtypen unterteilt, die dann im weiteren Verlauf detaillierter betrachtet werden.

3.3.1 Typisierungskriterien

Betrachtet wurden Bestandsgebäude im Allgemeinen. Es wurden keine Untersuchungen an speziellen Bauten durchgeführt, um eine geeignete Typisierung zu finden. Vielmehr wurden die Bautrends aus der relevanten Zeit analysiert, um daraus für die Untersuchungen der baulichen Integrierbarkeit entsprechende Grundtypen von Bürogebäuden definieren zu können.

Im ersten Schritt waren Kriterien wie z. B. die Konstruktionsart der tragenden Bauteile, der Decken und (nichttragenden) Innenwände, die Bauweise, die Fassade und letztendlich auch die verwendeten Materialien zu unterscheiden. Im Weiteren wurden der Verglasungsanteil und der Sonnenschutz ebenfalls als Typisierungskriterien für die Ermittlung der Grundtypen berücksichtigt.

In der weitergehenden Analyse wurden Kriterien berücksichtigt, die sich speziell auf die Voraussetzungen der Abgabe- bzw. der Erzeugersysteme beziehen. Auf der Seite der Abgabesysteme sind die wesentlichen Kriterien:

- Bauliche Ausbildung der Decken
- Vorhandensein eines Doppelbodens
- Vorhandensein von „massiven“ Brüstungen

Diese Kriterien sind entscheidend für die Auswahl geeigneter Abgabesysteme bei gegebenen Voraussetzungen.

Für die Auswahl geeigneter Erzeugersysteme sind unter anderem folgende Kriterien relevant:

- Gesamtkühlleistungsbedarf (des Gebäudes)
- Gebäudestandort
- Platzbedarf und statische Lasten der Systeme.

3.4 BETRACHTETE SYSTEME

Die Entscheidungshilfe stellt einen bedeutenden Teil der Informationsbroschüre dar. Sie soll die Wahl zwischen den verschiedenen Systemen erleichtern. Ausgehend von SIA 180, 1999 [4] und den baulichen Voraussetzungen, werden mögliche Systemtypen vorgeschlagen. Die Auswahl der Abgabe- und

Erzeugsysteme erfolgt separat. Die Vergleiche der Abgabe- und Erzeugsysteme sind Bestandteile der Entscheidungshilfe.

3.4.1 Abgabesysteme

Eine Analyse der am Markt erhältlichen effizienten Abgabetypen wurde durchgeführt. Folgende Systeme wurden ausgewählt:

- Kapillarrohrkühldecken
- Metallkühldecke
- Gipskühldecke
- Kühldecke mit Einbindung der Deckenmasse
- Kühlsegel
- Optimierte Brüstungsgeräte
- Kühlbalken Aktiv

Die Vergleichsparameter sind:

- Effizienz (kWh Kälte / kWh Strom)
- Flächenbedarf (m^2)
- Investitionskosten (Fr/ m^2 gekühlte Bodenfläche) (bei optimalen baulichen Voraussetzungen)
- Betriebskosten (Fr/ m^2 gekühlte Bodenfläche)
- Bauliche Integrierbarkeit
- Vorteile
- Nachteile

3.4.2 Erzeugsysteme

Eine Analyse der am Markt erhältlichen Erzeugsysteme wurde durchgeführt. Dabei wurden folgende Systeme zur Bearbeitung ausgewählt:

- Absorptionskältemaschine Fernwärme
- Grundwasserkühlung
- Seewasserkühlung
- Abwasserkühlung
- Flusswasserkühlung
- Erdsondenkühlung
- Freecooling mit Außenluft
- Kompressionskältemaschine
- Sorptionsgestützte Klimatisierung

Die Vergleichsparameter sind:

- Effizienz (kWh Kälte / kWh Strom)
- Investitionskosten (Fr/ m^2 Nutzfläche) (bei optimalen baulichen Voraussetzungen)
- Betriebskosten (Fr/ m^2 Nutzfläche)
- Bauliche Integrierbarkeit / Voraussetzungen für Verwendung
- Vorteile
- Nachteile

Nicht alle Erzeugersysteme eignen sich für alle Leistungsgrössen. Deshalb wurden drei verschiedene Gebäudegrössen mit zugehörender Kälteleistung definiert:

2'500 m² / 75 kW

8'500 m² / 255 kW

22'000 m² / 660 kW

4 Entscheidungshilfe

Die Entscheidungshilfe besteht aus zwei voneinander getrennten Teilen - der Wahl des Erzeugersystems und der Wahl des Abgabesystems. Mit Hilfe der Systemauswahl für die Abgabesysteme erhält man unter Berücksichtigung gegebener Randbedingungen eine reduzierte Auswahl generell möglicher Systeme. Die Randbedingungen beschreiben bauliche Eigenschaften des Gebäudes nach der Sanierung. Mit dieser Systemauswahl geht man anschliessend in den entsprechenden Systemvergleich um eine Entscheidung für ein System zu treffen. Im Systemvergleich finden konstruktionsunabhängige Faktoren, wie z.B. Kosten und Art der Kälteabgabe bzw. Effizienz der Kälteerzeugung und spezielle, das entsprechende System betreffende Vor- und Nachteile, Berücksichtung.

Für die Systemauswahl der Abgabesysteme werden nacheinander folgende bauliche Kriterien betrachtet:

- Grundkonstruktion
- Deckenkonstruktion
- Brüstung
- Doppelboden

Im Anschluss an die Systemauswahl die Art der Kälteabgabe, die Effizienz [$\text{kWh}_{\text{Kälte}}/\text{kWh}_{\text{Strom}}$] und die Investitions- und Betriebskosten [$\text{CHF}/\text{m}^2_{\text{Nutzfläche}}$] im Systemvergleich betrachtet.

Beim Systemvergleich der Erzeugersysteme, werden die Investitions- und Betriebskosten [CHF/kW] und die Effizienz [$\text{kWh}_{\text{Kälte}}/\text{kWh}_{\text{Strom}}$] verglichen.

4.1 EMPFEHLUNG LÜFTUNG

Die hohe Vorlauftemperatur bei der Raumkühlung hat nicht nur den Vorteil, dass ein solches System energieeffizienter ist und ein behaglicheres Innenraumklima bewirkt als Systeme mit tiefen Kühltemperaturen, auch kann bei schweizerischen Klimaverhältnissen häufig auf eine Kühlbatterie bei der Zuluftaufbereitung verzichtet werden. Wenn die Zuluftmenge auf die hygienisch notwendige Luftmenge begrenzt ist, reicht die Kälterückgewinnung von der Abluft aus um die Zuluft auf ein ausreichend tiefes Temperaturniveau zu konditionieren. Die Unterkühlung der Zuluft um Wasserausscheidung zu bewirken ist nicht mehr notwendig, da aufgrund der hohen Vorlauftemperatur bei der Raumkühlung im Raum die Kondensatgefahr sehr gering ist. Da die Feuchte im Raum jedoch unkontrolliert ist, muss eine grössere Bandbreite für den Komfortbereich toleriert werden. Es wird empfohlen, wenn möglich auf eine Kühlbatterie bei der Zuluftaufbereitung zu verzichten. So können nicht nur die Investitionskosten für die Zuluftaufbereitung verringert werden, auf die Produktion von Kälte mit tieferen Temperaturen einzig für Luftkühlung kann ebenfalls verzichtet werden.

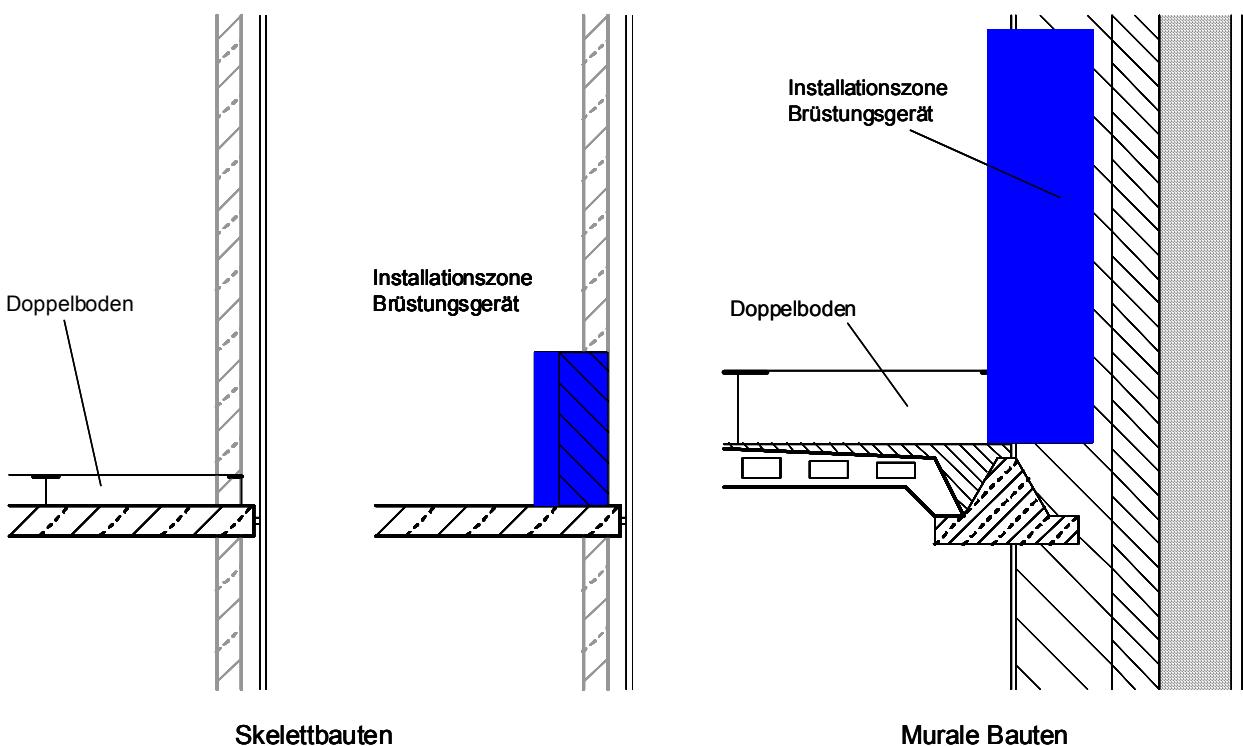
4.2 ABGABESYSTEME

Ein erster Ansatz war über den Kühlleistungsbedarf der Räume und den Leistungsbereich der Abgabesysteme eine erste Differenzierung und Reduzierung möglicher Systeme durchzuführen. Im Laufe der Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass alle Abgabesysteme den errechneten Kühlleistungsbedarf der einzelnen Gebäudetypen erbringen können. Auch eine höhere Küllast, die infolge geänderter Nutzung, Geräteausstattung, Himmelsausrichtung etc. zu Stande kommen kann, ist unter Umständen mit jedem der betrachteten Abgabesysteme abführbar. Komforteinbussen infolge erhöhter abzuführender Küllasten sind ebenfalls bei keinem der betrachteten Systeme zu erwarten. Jedoch kann bei denjenigen Abgabesystemen, die konvektiv die Küllasten abführen, ein erhöhter Luftvolumenstrom oder Luftwechsel nötig werden. Ist dies der Fall, dann besteht die Gefahr von Zugerscheinungen. Deswegen wird der Fokus der weitergehenden Untersuchung auf „harte“ Auswahlkriterien gelegt. Mit harten Kriterien sind eindeutige Eigenschaften die Konstruktion und die baulichen Gegebenheiten betreffend gemeint. Solche Kriterien werden im Zuge der Sanierung festgelegt und werden sich im Laufe der Nutzung nicht mehr ändern, vorausgesetzt es folgt keine weitere Sanierung oder ein erneuter Umbau. Die Reduzierung auf eine Auswahl von Abgabesystemen erfolgt mit der schrittweisen Abklärung folgender Fragestellungen, die die Konstruktion betreffen:

- Ist der bestehende Bau in Skelettbauweise errichtet worden oder ist es ein Muraler Bau?
- Wie ist der Aufbau der Deckenkonstruktion nach der Sanierung (gewünscht)?
- Ist nach der Sanierung (bei den Skelettbauten) eine (zusätzliche massive) Brüstung im Raum vorgesehen/ vorhanden?

Nach Beantwortung der Fragen, ausgehend von einer gewünschten Raumtemperatur von $T < 26.5^{\circ}\text{C}$ und der Überlegung, ob die Raumfeuchte kontrolliert werden soll, erhält man als Ergebnis eine Auswahl generell einsetzbarer Abgabesysteme. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich unterschiedliche Reduzierungskriterien gegenseitig beeinflussen können. Bei Gebäuden in Skelettbauweise kann beispielsweise bei einer gewünschten abgehängten Decke selten zusätzlich noch ein Doppelboden realisiert werden, da bei der Kombination von abgehängter Decke und Doppelboden, vor allem in grossen Räumen, oft nicht genügend aktive Speichermasse zur Verfügung steht, um die gesetzlichen Anforderungen zu erfüllen (vgl. Figur 35). Nach SIA 382/1 ist eine auf die NettoGESCHOSSSLÄCHE bezogene Wärmespeicherfähigkeit des Raumes von mindestens $C_R/A_{NGF}=30 \text{ Wh}/(\text{m}^2*\text{K})$ Voraussetzung, um diesen kühlen zu dürfen [3]

Des Weiteren schliessen sich bei Skelettbauten für die Betrachtung der baulichen Integrierbarkeit die Kriterien Brüstung und Doppelboden nahezu aus. In Fassaden-/ Aussenwandnähe stehen die Brüstungen, die nicht in der Fassade integriert sind, auf dem Rohfussboden. Wenn bei Skelettbauten, von innen gesehen, Brüstungen vor die Fassade gesetzt werden, dann ist es schwierig noch zusätzlich einen Doppelboden zu realisieren. Deswegen sollte die Entscheidung getroffen werden, ob bei Skelettbauten entweder eine Brüstung mit möglichem Einsatz eines Optimierte Brüstungsgerätes oder ein Doppelboden mit möglichen Leitungsführungen realisiert werden soll.



Figur 2: Anordnung von Doppelboden und Installationszone Brüstungsgerät im Schnitt

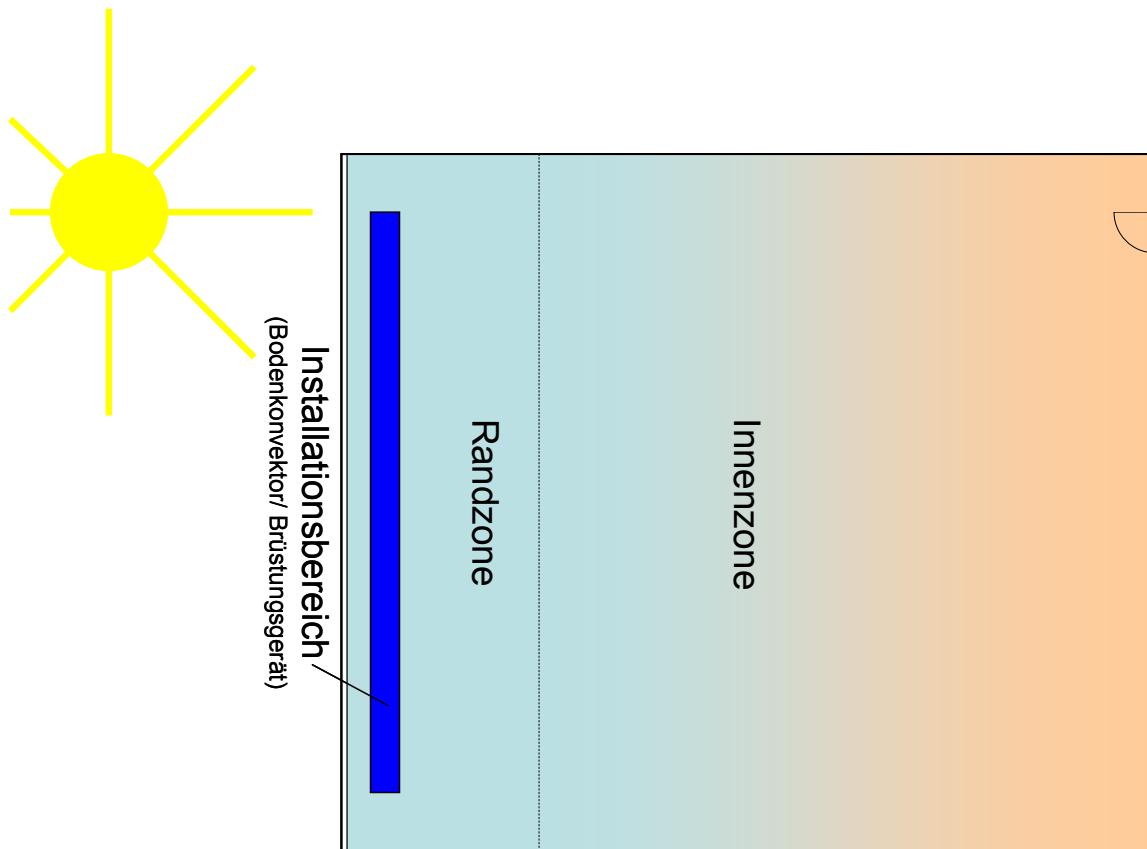
Beide Möglichkeiten zu kombinieren stellt keine sinnvolle Alternative dar. Bei Muralen Bauten sind die Brüstungen von Anfang an Bestandteil der Außenwand, so dass es bei diesem Typ keine Gebäude ohne Brüstung gibt. Aufgrund dieser Tatsache schliesst sich bei muralen Gebäuden auch die Kombination von Doppelboden und Brüstung (mit eventuellem Einsatz von Optimierte Brüstungsgeräten) nicht aus.

Nach der Reduktion auf generell einsetzbare Abgabesysteme durch Beantwortung der oben aufgeführten Fragestellungen sind noch zusätzliche Überlegungen anzustellen, um die Auswahl möglicherweise noch weiter zu reduzieren:

- Welche Geometrie hat der zu kühlende Raum?

- Wie ist die Verteilung der Kühllasten im Raum?
- Was für ein Nutzungskonzept wird verfolgt?
- Gibt es Nutzungen einzelner Räume (z. B. Kantine, Serverraum, etc.), die einer besonderen Kühlung bedürfen?

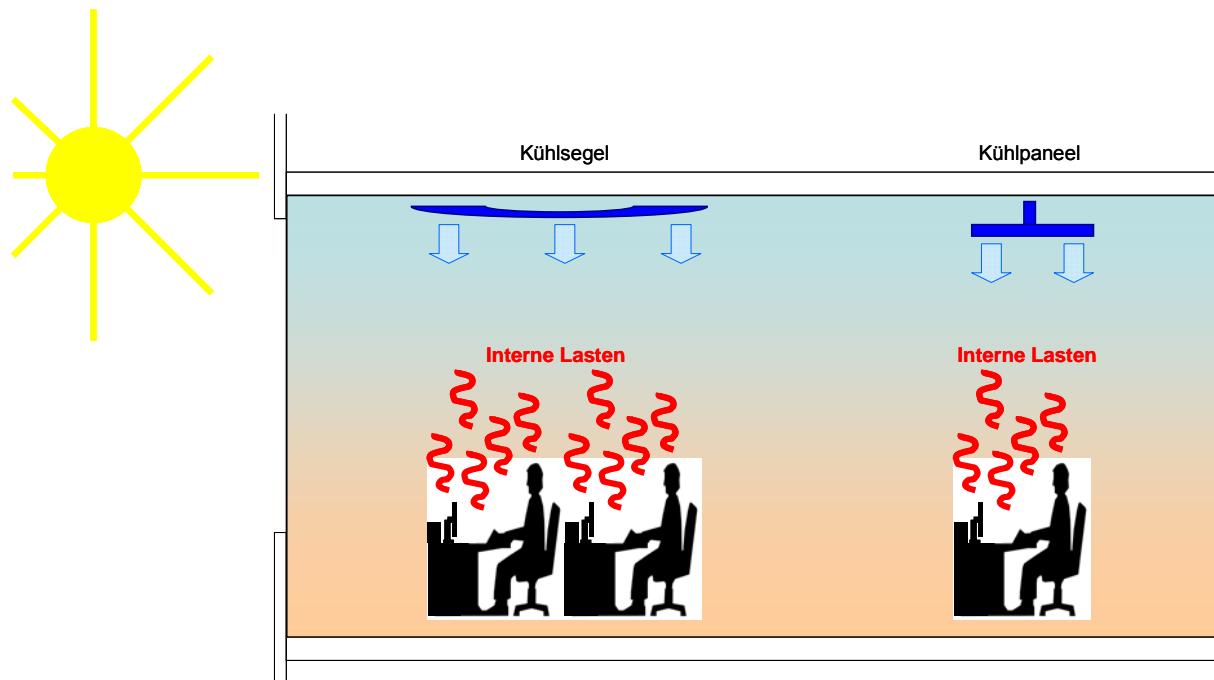
Die Abklärung der Frage der zukünftigen Raumgeometrien ist wichtig, um die erforderliche Kühlung mit einem geeigneten System gleichmäßig in den Raum einbringen zu können, ohne dass grosse Temperatursymmetrien im Raum entstehen. So ist es bei tiefen Räumen mit grossen Abmessungen, wie es z. B. bei Grossraumbüros der Fall ist, nur schlecht möglich, mit Optimierten Brüstungsgeräten ein angenehmes Raumklima zu erbringen. Das liegt daran, dass dieses Abgabesystem (meistens) nahe der Fassade in vorhandene Bauteile integriert werden. Um von der Randzone des Raumes aus den gesamten Raum, Randzone und Innenzone, entsprechend kühlen zu können, ist eine sehr hohe Kühlleistung des Systems erforderlich. Die kontinuierlich hohe Leistungsabgabe hat allerdings sehr tiefe Temperaturen in der Randzone zur Folge, die ausserhalb des Behaglichkeitsbereichs liegen. Zusätzlich ist nicht gewährleistet, dass die Innenzone des Raumes, die am weitesten vom Abgabesystem entfernt liegt, trotz der hohen Kühlleistung im Randbereich, ausreichend gekühlt wird.



Figur 3: Raumzonierung (Grundriss)

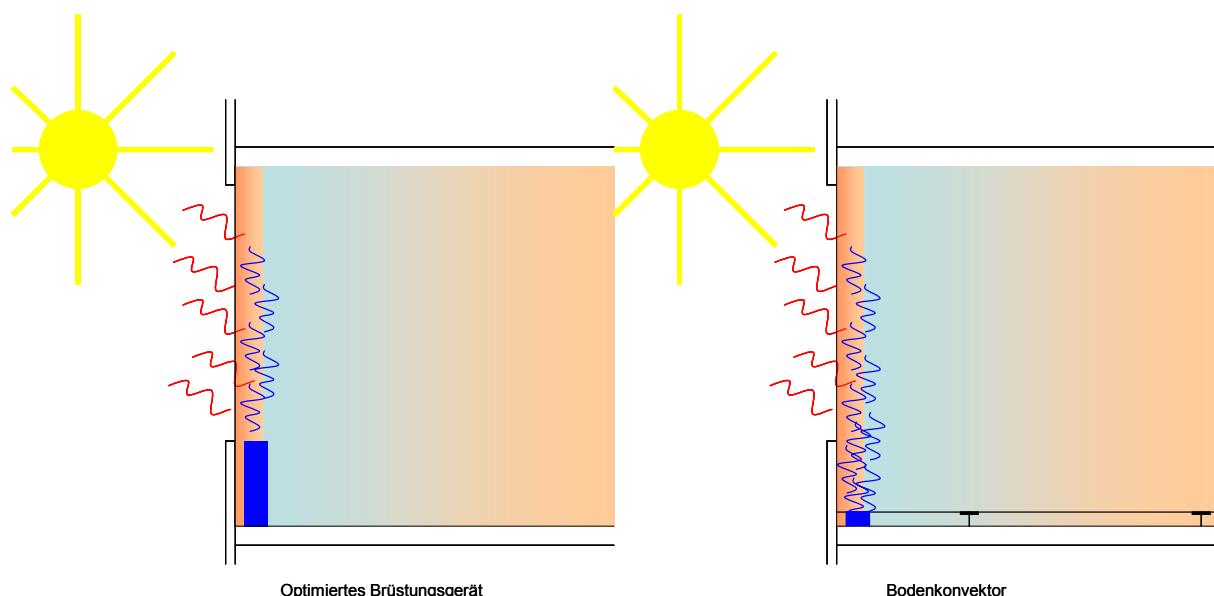
Auch wenn beide Systeme den Raum hauptsächlich durch Konvektion kühlen und so keine Temperaturunterschiede und keine Verschlechterung der Behaglichkeit infolge Strahlungsasymmetrien entstehen, so sind die Behaglichkeitseinbussen durch die Temperaturdifferenz zwischen Rand- und Innenzone doch beachtlich. Ebenfalls kann keine ausreichende Durchmischung der Raumluft mit kühlerer Zuluft im gesamten Raum gewährleistet werden, so dass in der Innenzone des Raumes generell ein schlechteres Raumklima entstehen würde. Für grosse Räume sind demnach solche Abgabesysteme geeignet, die gleichmäßig im Raum verteilt werden können und dadurch eine gleichmässige Raumkühlung ermöglichen. Welche Systeme im speziellen eingesetzt werden können, ob Kühldecken, Kühlpaneele oder Kühlsegel o. a., hängt wiederum von weiteren Kriterien ab. Diese weiteren Kriterien beziehen sich vor allem auf die Ausbildung der Deckenfläche bzw. der Deckenkonstruktion. So sind beispielsweise abgehängte Kühldecken nur realisierbar, wenn eine abgehängte Decke geplant ist. Für die anderen Kühldecken, z. B. eingeputzte Kapillarrohrmatten oder Kühlmodule mit Einbindung der Deckenmasse, besteht die Notwendigkeit einer freien Betondecke mit ebener Deckenfläche.

Einen weiteren wichtigen Punkt bei der Wahl des Abgabesystems stellt die Verteilung der Kühllasten im Raum dar. Sind die Kühllasten punktuell verteilt, dann bietet sich der Einsatz von Kühlsegeln oder von aktiven Kühlpaneelen an. Diese Systeme können durch ihre konstruktive Ausbildung sehr genau über dem Entstehungspunkt der Kühllasten integriert werden um dort die anfallenden Lasten direkt abführen zu können.



Figur 4: Kälteabgabe von Kühlsegel und Kühlpaneel (Schnitt)

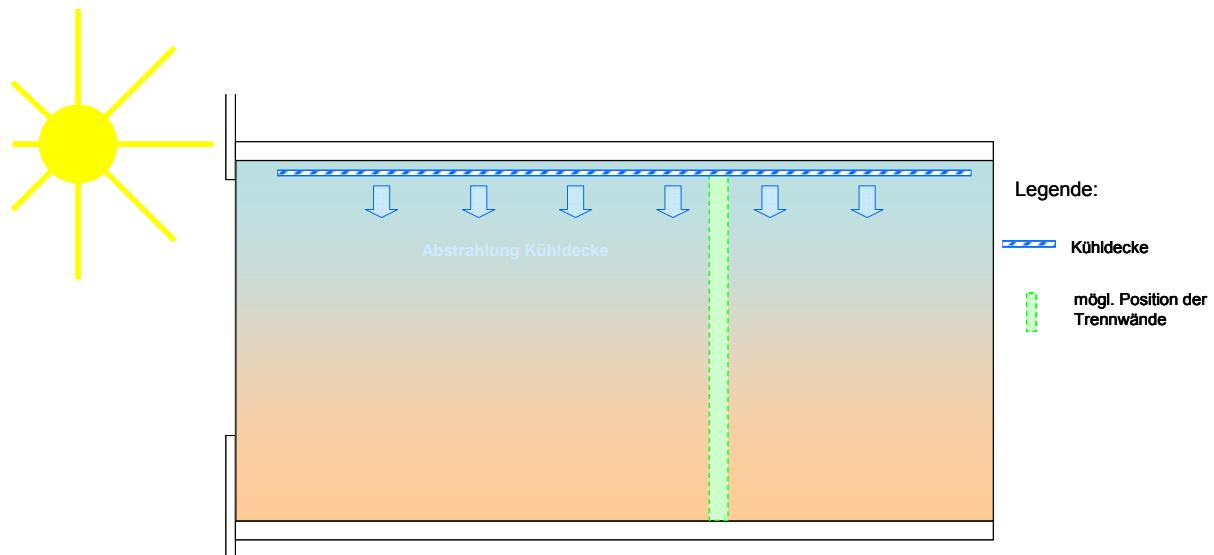
Damit kann eine Ausbreitung der Wärme im Raum vorgebeugt werden. Wenn hohe externe Kühllasten den Grossteil der Gesamtkühllasten des Raumes ausmachen, dann ist es ratsam, Optimierte Brüstungsgeräte zu installieren. Durch ihre Nähe zur Außenhaut des Gebäudes kann diese Art der Abgabesysteme dazu beitragen, den Hauptbestandteil der abzuführenden Kühllasten aus dem Raum fern zu halten. Dies ist möglich durch eine "Kältewand" bzw. einen "Kälteschleier" vor der Fensterfläche, der durch Brüstungsgeräte hergestellt werden kann.



Figur 5: Kälteabgabe von Brüstungsgerät und Bodenkonvektor (Schnitt)

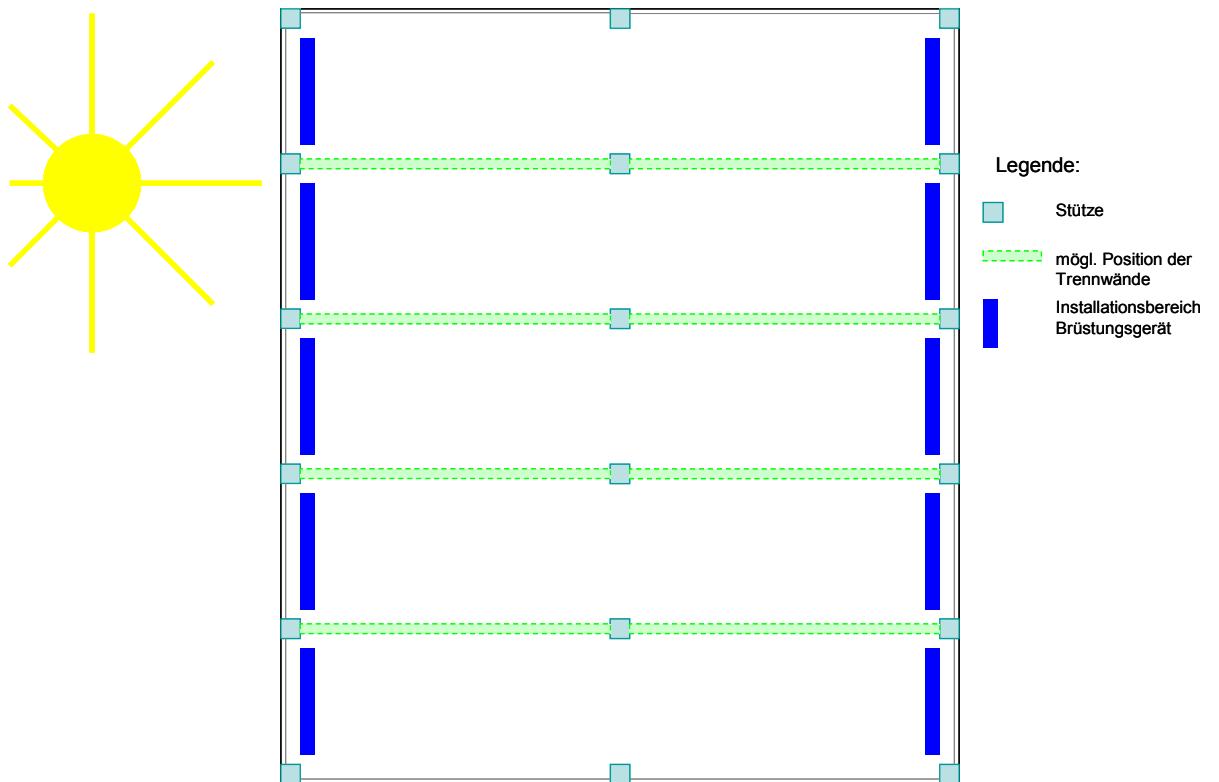
Besteht allerdings eine gleichmässige Verteilung der Kühllasten, sowohl im Raum selber, als auch im Verhältnis von externen zu internen Kühllasten, dann sind Kühldecken jeglicher Ausführungsart prädestiniert (vgl. dazu auch Figur 6). Der grosse Vorteil von abgehängten Kühldecken ist die Flexibilität in der Ausführung und die Gestaltungsmöglichkeit der Deckenoberfläche. Zusätzlich können abgehängte Kühldecken schallschutztechnische Aufgaben übernehmen. Wenn allerdings im sanierten Gebäude keine abgehängten Decken vorgesehen sind, dann stellt die Gipsdecke mit Kapillarrohren als flächiges Kühldeckensystem ein weiteres mögliches Abgabesystem als Alternative zur abgehängten Kühldecke dar.

Eine weitere Frage, die geklärt werden muss, ist die des angestrebten Nutzungskonzeptes. Mögliche Konzepte sind z. B. die Nutzung der Büroräume im Grossraumbüro oder als Einzelbüros, feste Arbeitsplätze oder flexible Docking-Stations für den Bedarfsfall. Sollen die Büroräume flexibel sein und individuell angepasst werden können? Je nach Nutzungskonzept ergeben sich die Grösse der Räume und deren Änderungsmöglichkeit bzw. die Notwendigkeit, die Räume bei Bedarf anzupassen. Räume können, vor allem in ihrer Grösse, den jeweiligen Bedürfnissen einzelner Nutzer gut angepasst werden, wenn flexible und leicht umsetzbare Raum-Trennwände vorgesehen werden. Die Möglichkeit der variierenden Raumgrössen, -geometrien und -nutzungen sollte durch die Wahl des Abgabesystems nicht eingeschränkt werden. Für flexible Räume empfiehlt sich demnach die Installation von ebenfalls möglichst flexiblen Abgabesystemen. Eine sinnvolle Alternative wäre z. B. der Einsatz von Kühldecken, da diese eine geschlossene Deckenfläche vorweisen, so dass Trennwände gut zwischen Fussboden und abgehängter Decke integriert werden können.



Figur 6: Integration von Trennwänden im Raum bei installierten Kühldecken (Schnitt)

Brüstungsgeräte sind zwar an den Standort in Fassadennähe gebunden, und demnach nicht flexibel im oben genannten Sinn, jedoch stellt dies kein Ausschlusskriterium dar. Brüstungsgeräte werden in vorhandene Bauteile der Fassaden integriert. Diese Bauteile folgen sowohl bei Skelettbauten, als auch bei Muralen Bauten, einem bestimmten Raster. Dieses Raster ist zum einen durch die Lage der Fensteröffnungen bei muralen Gebäuden, zum anderen durch die Position der Stützen bei Skelettbauten gegeben. Die Position der umsetzbaren Trennwände wird sich aus gestalterischen und konstruktiven Gründen immer an diesem Raster, dem auch die Brüstungen bei beiden Konstruktionstypen unterliegen, orientieren.



Figur 7: Konstruktionsraster eines Gebäude in Skelettbauweise (Grundriss)

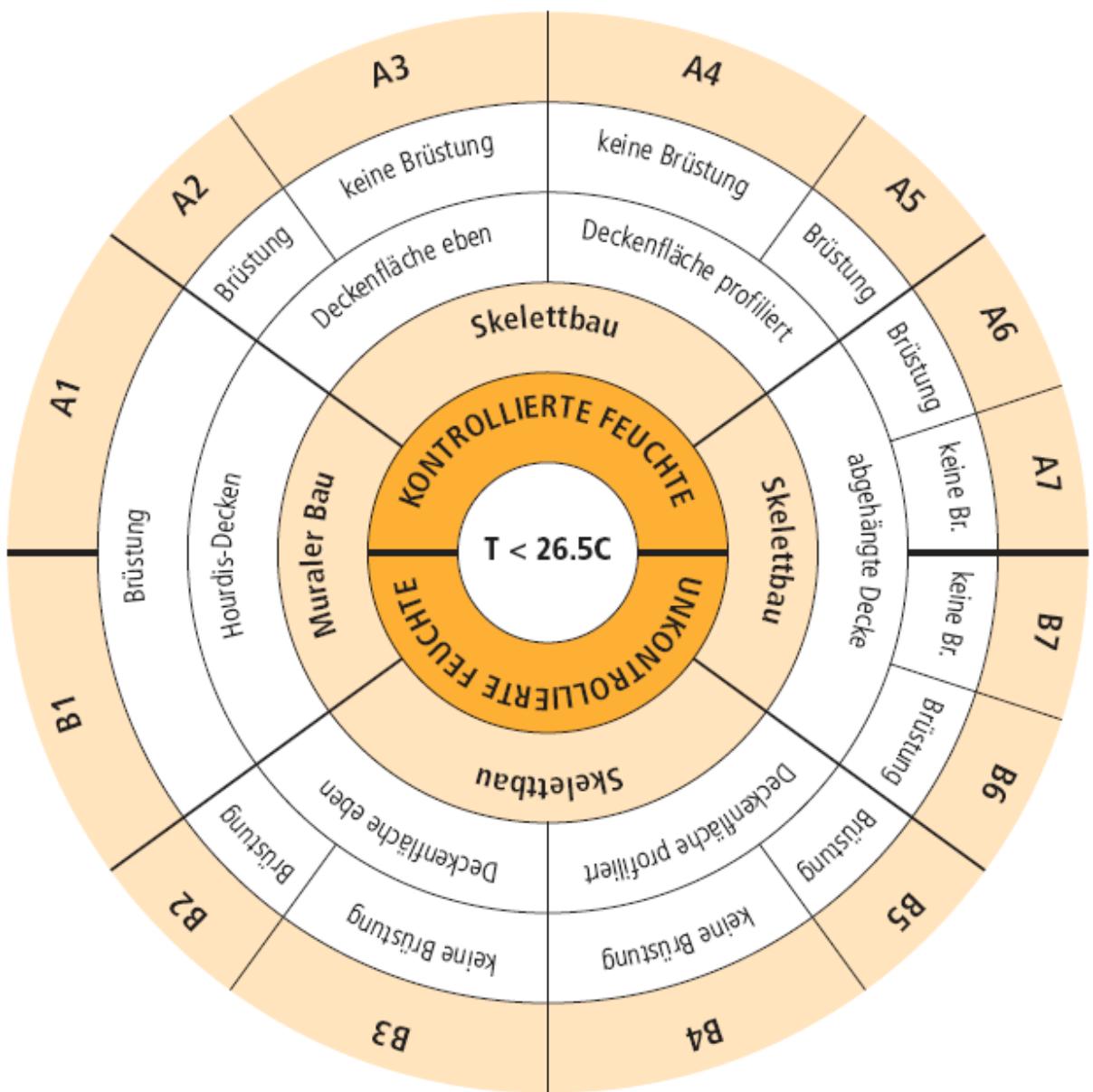
Weiterhin muss abgeklärt werden, ob im Bürogebäude Räume besonderer Nutzung geplant sind. Für die Betrachtung der Raumkühlung zählen zu den Räumen besonderer Nutzung unter anderem Serverräume, Reproduktionsräume, Kantine bzw. Cafeteria etc. Solche Räume bedürfen einer besonderen Kühlung und sie müssen überwiegend das ganze Jahr über gekühlt werden. Diese internen Kühllasten in solchen Räumen übersteigen die Höhe der internen Kühllasten, die durch eine "normale" Büronutzung entstehen, um ein Vielfaches. Hier ist die Überlegung anzustellen, ob speziell für diese Räume ein eigenes Abgabesystem eingesetzt wird, das unabhängig von der restlichen Gebäudekühlung betrieben wird, oder ob die Kühlung des gesamten Gebäudes, inklusive der Räume besonderer Nutzung, einheitlich gekühlt werden soll.

Die Entscheidungshilfe für Abgabesysteme besteht aus zwei Teilen; ein Reduzierungsvorgang aufgrund von baulichen Randbedingungen und ein Vergleich verschiedener Systeme.

4.2.1 Reduzierung von möglichen Systemen

Der Reduzierungsvorgang bezieht sich auf die bauliche Situation nach der Sanierung (Figur 8). Die Rose wird von Innen nach Außen gelesen. Jeder untenstehende Punkt entspricht einem Ring in der Rose:

1. Zuerst muss entschieden werden ob eine kontrollierte Raumluftfeuchte erwünscht ist oder nicht.
2. Welche Grundkonstruktion hat das Gebäude?
3. Welche Art von Decke ist vorgesehen?
4. Wird eine Brüstung vorhanden sein oder nicht?
5. Die unter den baulichen Randbedingungen möglichen Systeme sind unter der Ziffer A1–7 oder B1–7 im Figur 9 zu finden.



Figur 8: Entscheidungshilfe, Teil Abgabesysteme

| | A (kontrollierte Feuchte) | | | | | | | B (unkontrollierte Feuchte) | | | | | | |
|---|---------------------------|---|---|---|---|---|---|-----------------------------|---|---|---|---|---|---|
| mögliche Abgabesysteme | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Metallkühldecke | X | | | | | X | X | X | | | | | X | X |
| Gipskühldecke | X | | | | | X | X | X | | | | | X | X |
| Kapillarrohrkühldecke | | X | X | | | | | | X | X | | | | |
| Konvektive Kühldecke | X | | | | | X | X | X | | | | | X | X |
| Kühlsegel | | X | X | X | X | | | | X | X | X | X | | |
| Aktive Kühlpaneele bzw. Kühlbalken | X | X | X | X | X | X | X | | | | | | | |
| Optimiertes Brüstungsgerät | X | X | | | X | X | | X | X | | | | X | X |
| Kühlmodule mit Einbindung der Deckenmasse | | X | X | | | | | | X | X | | | | |

Figur 9: Entscheidungshilfe, Teil Abgabesysteme

4.2.2 Abgabesystemvergleich mit Kenndaten

Kapillarrohrkühldecke

Bei der Kapillarrohrkühldecke werden wasserführende Kapillarrohre aus Kunststoff z.B. an der Rohdecke verklebt und später verputzt, dabei entsteht eine fugenlose Decke. Eine Variante ist die Verlegung der Kapillarrohrmatten auf bestehenden Metallplatten mit anschliessender Isolation nach oben.



Figur 10: Kapillarrohrkühldecke

| | Effizienz kWh Kälte / kWh Strom - | Investitions- kosten* [CHF/ m ² BF] | Energie- kosten [CHF/m ² BFa] | Flächen- bedarf [m ² AF/m ² BF] |
|-----------------------------|--|--|--|---|
| Kapillarrohr- kühldecken | 80 - 100 | 120 - 210 | 0.6 - 0.8 | 0.4 - 0.7 |

* Zuzüglich Deckenmaterial (Putz / Deckenplatten)

Tabelle 1 Kennwerte der Kapillarrohrkühldecke

Vorteile:

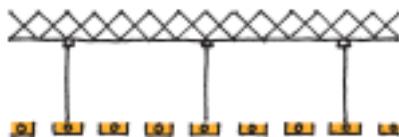
- Verwendung als Kühl- und als Heizdecke möglich
- geringe Einbauhöhe und damit sehr gut für Sanierungen geeignet

Nachteile:

- Kapillarrohre nicht zugänglich, wenn diese verputzt sind
- Keine Gestaltungsfreiheit bei der Deckenfläche bei verputzten Kapillarrohren

Konvektive Kühldecke

Die „Konvektive Kühldecke“ ist ein statisches Kühldeckensystem mit einer sichtbaren Deckenoberfläche in Form von Kühllamellen in Paneelstruktur. Die Kühllamellen bestehen aus Aluminiumprofilen in die Kupferrohre eingeführt werden, so dass diese optimal wärmeleitend mit dem Aluminiumprofil verbunden sind. Durch diese Kupferrohre strömt das Kaltwasser. Ein Teil der Kühllastabfuhr erfolgt mittels Strahlung. Der andere Teil erfolgt konvektiv über eine kontinuierliche Luftzirkulation bedingt durch Eigenkonvektion. Die erwärmte Luft steigt auf, wird durch die Kühldeckenelemente abgekühlt und sinkt ab, eine Luftzirkulation entsteht. Ein Nachströmen von Ersatzluft muss durch die Ausbildung der Deckenkonstruktion ermöglicht werden.



Figur 11: Konvektive Kühldecke

| | Effizienz kWh Kälte / kWh Strom - | Investitions- kosten [CHF/ m ² BF] | Energie- kosten [CHF/m ² BFA] | Flächen- bedarf [m ² AF/m ² BF] |
|---|--|---|--|---|
| Kühldecken mit hohem konvekti- ven Anteil | 70 - 110 | 110 - 260 | 0.6 - 0.8 | 0.2 - 0.3 |

Tabelle 2 Kennwerte der Kühldecke mit hohem konvektiven Anteil

Vorteile:

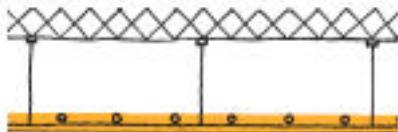
- Nutzung der Speicherfähigkeit der Rohdecke und damit ein gutes dynamisches Verhalten

Nachteile:

- Hohe Investitionskosten je nach Temperaturspreizung

Gipskühldecke

Das Abgabesystem Gipskühldecke gehört zu der Gruppe der Kontakt-Kühldeckensysteme mit Wasser als Kälteträgerflüssigkeit. Die sichtbare Unterseite der Kühldecke kann sowohl aus gelochten, als auch aus ungelochten Gipskartonplatten bestehen. Auf deren Rückseite werden mäanderförmig gebogene Kupferrohre verlegt, durch die das Kaltwasser zirkuliert. Durch den grossflächigen und dauerhaften Kontakt zwischen Kühldeckenelement und Gipskartonplatte wird eine gleichmässige Oberflächentemperatur erzeugt, die durch Strahlung an den Raum abgegeben wird.



Figur 12: Gipskühldecke

| | Effizienz kWh Kälte / kWh Strom - | Investitions- kosten* [CHF/ m ² BF] | Energie- kosten [CHF/m ² BFA] | Flächen- bedarf [m ² AF/m ² BF] |
|----------------|--|--|--|---|
| Gipskühldecken | 70 - 80 | 160 - 290 | 0.8 - 0.9 | 0.4 - 0.6 |

* Zuzüglich Deckenplatten

Tabelle 3 Kennwerte der Gipskühldecke

Vorteile:

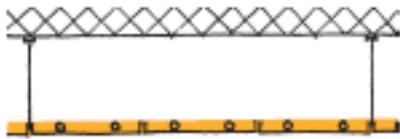
- schallabsorbierende bzw. schallreflektierende Ausbildung der Decke möglich
- sowohl Kühl- als auch Heizfunktion

Nachteile:

- nicht klappbar, dadurch erschwerter/ kein Zugang zu den Kupferrohren und anderen Systemkomponenten für Wartungsarbeiten

Metallkühldecke

Metallkühldecken werden ebenfalls der Gruppe der Kontakt-Kühldecken zugeordnet. Die sichtbare, aus beschichtetem Metall bestehende Unterseite kann je nach Anforderung sowohl gelocht als auch ungelocht ausgebildet sein. Auf der Rückseite sind mäanderförmig gebogene Kupferrohre verlegt, durch die das Kaltwasser fliesst. Die gleichmässige Oberflächentemperatur, die durch Strahlung an den Raum abgegeben wird, wird durch den grossflächigen und dauerhaften Kontakt zwischen Kühldeckenelement und Metaldecke gewährleistet.



Figur 13: Metallkühldecke

| | Effizienz kWh Kälte / kWh Strom - | Investitions- kosten* [CHF/ m ² BF] | Energie- kosten [CHF/m ² BFa] | Flächen- bedarf [m ² AF/m ² BF] |
|------------------|--|--|--|---|
| Metallkühldecken | 70 - 80 | 120 - 210 | 0.8 - 0.9 | 0.4 - 0.5 |

* Zuzüglich Deckenplatten

Tabelle 4 Kennwerte der Metallkühldecke

Vorteile:

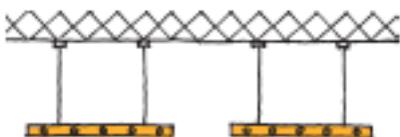
- schallabsorbierende bzw. schallreflektierende Ausbildung der Decke möglich
- klappbar bzw. abnehmbar, dadurch gute Zugänglichkeit der wasserführenden Komponenten bei Wartungsarbeiten
- sowohl Kühl- als auch Heizfunktion

Nachteile:

- Lackierung der Deckenelemente wegen des geringen Absorptionsfaktors (von Aluminium) erforderlich

Kühlsegel

Kühlsegel können grundsätzlich sowohl mit Luft als auch mit Wasser als Kälteträgermittel arbeiten. Systeme mit Kaltwasser basieren auf dem Prinzip der Kontakt-Kühldeckensysteme (vgl. Gipskühldecke und Metallkühldecke). Durch die Hinterlüftung des Segels und die dadurch erhöhte Leistungsfähigkeit im Vergleich zu einer statischen Kühldecke, werden sie häufig für punktuell hohe Kühllasten eingesetzt.



Figur 14: Kühlsegel

| | Effizienz kWh Kälte / kWh Strom - | Investitions- kosten [CHF/ m ² BF] | Energie- kosten [CHF/m ² BFa] | Flächen- bedarf [m ² AF/m ² BF] |
|-----------|--|---|--|---|
| Kühlsegel | 70 - 90 | 320 - 590 | 0.7 - 0.9 | 0.3 - 0.4 |

Tabelle 5 Kennwerte des Kühlsegels bei Wasser als Kälteträgermittel

Vorteile:

- hohe spezifische Leistungen aufgrund der Hinterlüftung
- Nutzung der Speicherkapazität der Rohdecke bei freien Decken mit ausreichender aktiver Speichermasse
- sowohl Kühl- als auch Heizfunktion und, je nach Ausführung, Frischluftzufuhr

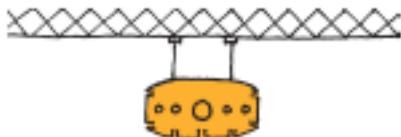
- als Multifunktionselemente wie z. B. Einbauleuchten, Rauchmelder etc. realisierbar
- Herstellbar in verschiedenen Formen

Nachteile:

- Bei Luft als Kälteträgermedium grosse Querschnitte der Verteilsysteme

Aktive Kühlpaneele bzw. Kühlbalken

Bei diesem Kühlelement handelt es sich um ein Kühldeckenpaneel, welches je nach Kundenwunsch in der abgehängten Decke integriert, aber auch freihängend unter der Decke realisiert werden kann. Die Kühlung erfolgt sowohl durch Strahlung mittels zirkulierenden Kaltwassers, als auch konvektiv über Luftkühlung.



Figur 15: Aktive Kühlpaneele bzw. Kühlbalken

| | Effizienz kWh Kälte / kWh Strom | Investitions- kosten [CHF/ m ² BF] | Energie- kosten [CHF/m ² BFA] | Flächen- bedarf [m ² AF/m ² BF] |
|-------------------|---------------------------------------|---|--|---|
| Aktive Kühlbalken | 50 - 60 | 80 - 170 | 1.1 - 1.2 | 0.03 - 0.05 |

Tabelle 6 Kennwerte der aktive Kühlbalken

Vorteile:

- sowohl Kühl- als auch Heizfunktion und Frischluftzufuhr
- Kein zusätzlicher Zuluftauslass notwendig

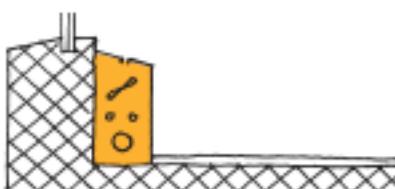
Nachteile:

- Risiko für Tauwasseranfall bei unkontrollierter Feuchte oder zu niedrigen Zulufttemperaturen

Optimiertes Brüstungsgerät

Das Optimierte Brüstungsgerät folgt dem Ventilatorkonvektor-Prinzip. Raumluft wird in das Brüstungsgerät angesaugt und wird dort an Wärmetauschern vorbeigeleitet, die mit Kaltwasser beschickt werden. Der angesaugten Raumluft wird dabei Wärmeenergie entzogen. Die abgekühlte Luft wird anschliessend mit Frischluft gemischt und als Zuluft dem Raum wieder zugeführt. Auf diese Weise wird der Raum gekühlt. Bei einem geeigneten Betriebskonzept kann zusätzlich die aktive Speichermasse des Raumes genutzt werden, um einen Teil der abzuführenden Kühllast vom Tag auf die Nacht zu verschieben. Damit lässt sich der Free Cooling-Anteil an der gesamten Kühlenergie erhöhen.

Die optimierten Brüstungsgeräte arbeiten mit der Gebäudemasse, weshalb sie sich nicht unter gleiche Bedingungen mit den anderen Abgabesystemen vergleichen lässt. Bei optimalen Bedingungen liegen die Effizienz bei 35-50, die Investitionskosten bei 240-290 CHF/m² Bodenfläche und die Energiekosten bei 1.5-1.8 CHF/m² Bodenfläche und Jahr. Der Flächenbedarf beträgt 0.05-0.06 m² Aktive Fläche pro Bodenfläche.



Figur 16: Optimiertes Brüstungsgerät

Vorteile:

- Umluftbetrieb ermöglicht kurze Reaktionszeit bei schnell entstehenden Kühlbedarf
- Individuelle Temperatureinstellung pro Gerät
- Integrierter Frischluft-Kanal
- Neben der Kühlfunktion auch Heizen möglich
- Kanal für Stark- und Schwachstrom und zusätzliche Dämmung der Brüstungsdämmung
- keine Zugerscheinungen trotz Luftkühlung
- Tiefer Schallleistungspegel im Raum, ca. 25dB(A)
- Variante mit tiefer Bauhöhe erhältlich für vollverglaste Fassaden

Nachteile:

- Bei vollverglasten Fassaden (aus architektonischen Gründen) nicht immer einsetzbar
- Muss bei Raumtiefen über 8 m mit anderem System für die Innenzone ergänzt werden.

Kühlmodule mit Einbindung der Deckenmasse

Ein aus Aluminium-Strangpressprofilen gefertigter Rahmen wird nahe der Betondecke angeordnet. In den Rahmen werden perforierte Strahlungsprofile klappbar eingelegt. Das Prinzip dieses Kühlsystems basiert hauptsächlich auf der thermischen Speicherfähigkeit des Betons. Je nach Regelstrategie wirkt dieses System als selbstregelndes, thermoaktives Bauteilsystem (TABS) oder als Kühldeckensystem mit hohem Strahlungsanteil. Tagsüber wird die auftretende Kühllast zum Grossteil in der freien Betondecke gespeichert, nachts wird diese Wärmemenge dem Beton wieder entzogen. Im Gegensatz zu einem statischen Kühlverhalten, bei dem die volle Kühllast während der Betriebszeit abgeführt wird, wird es durch die Einbindung der Deckenmasse möglich, auch ausserhalb der Betriebszeit Kühllast abzuführen. Besteht während der Betriebszeit eine sehr hohe Kühllast, so dass die Temperaturen durch das TABS alleine nicht mehr im Komfortbereich gehalten werden können, dann besteht die Möglichkeit der zusätzlichen aktiven Kühlung nach dem Prinzip einer Kühldecke.

Die Kühlmodule mit Einbindung der Deckenmasse arbeiten mit der Gebäudemasse, weshalb sie sich nicht unter gleiche Bedingungen mit den anderen Abgabesystemen vergleichen lässt. Bei optimalen Bedingungen liegen die Effizienz bei 70-80, die Investitionskosten bei 180-220 CHF/m² Bodenfläche und die Energiekosten bei 0.8-0.9 CHF/m² Bodenfläche und Jahr. Der Flächenbedarf beträgt 0.3-0.4 m² Aktive Fläche pro Bodenfläche.



Figur 17: Kühlmodul mit Einbindung der Deckenmasse

Vorteile:

- Lastabfuhr erfolgt über gesamten Tages-/ Nachtzyklus
- Sowohl bei niedrigen thermischen Lasten durch TABS als auch bei hohen thermischen Lasten durch zusätzliche Kühldeckenfunktion einsetzbar
- Klappbare Trägerrahmen für die Wartung
- Neben der Kühlfunktion auch Heizen möglich
- Ausbildung als Akustikelement möglich

Nachteile:

- Auslegung nur mit Hilfe von dynamischen thermischen Simulationen
- Beschränkte Einsatzmöglichkeiten (freie, ebene Betondecke mit ausreichender Speichermasse ist Voraussetzung)

4.3 ERZEUGERSYSTEME

Um einen energie- und exergieeffizienten Kühlbetrieb sicherzustellen, sollen die am Gebäudestandort verfügbaren Möglichkeiten zur Freecooling optimal genutzt werden. Dass heisst, die Umgebungswärmenesken soll maximal zur Kühlung ausgenutzt werden. Diese können Grundwasser, Erdsonden, Seewasser etc. oder auch Aussenluft sein. Sinnvoll ist es auch, im Betrieb vorhandene Abwärme oder solare Wärme zur thermischen Kälteproduktion zu verwenden. Die Kälteproduktion und die Rückkühlung ist bei der Auslegung als Gesamtsystem zu betrachten. Nur ein optimales Zusammenspiel dieser beide Komponenten, sowie eine ausführliche Betriebsoptimierung holt das Maximum an Energieeffizienz aus dem System. Wenn grössere Anlagen konzipiert werden, dürfen sie gerne modular aufgebaut sein. Der Teillastbetrieb wird so häufig effizienter und die Redundanz wird gewährleistet.

4.3.1 Bauliche Integrierbarkeit

Mit der baulichen Integrierbarkeit der Erzeugersysteme wurde vor allem untersucht, welche Aspekte bei der Auswahl eines passenden Systems berücksichtigt werden müssen.

Neben der Betrachtung des Gebäudestandortes stellt der zur Verfügung stehende Platz zur Unterbringung der Systeme und Systemkomponenten im Gebäude ein weiteres Auswahlkriterium der Erzeugersysteme dar. Bei Bestandgebäuden hat es sich als schwierig erwiesen, zusätzliche Flächen für Systeme der Gebäudetechnik zur Verfügung zu stellen. Oft sind die Flächen für Technik, Sanitäranstaltungen, Lüftungs- und Klimazentrale und Verteilsysteme sehr knapp bemessen, so dass es sich als eine grosse Herausforderung herausgestellt hat, zusätzlich benötigte Flächen und Räume zu generieren.

Weiterhin ist die Frage der statischen Lasten zu klären. Vor allem Kältemaschinen haben ein hohes Eigengewicht. Daher ist im Vorfeld abzuklären, ob durch die zusätzlichen Lasten die Standfestigkeit des Gebäudes, durch beispielsweise Eigengewicht der Maschine oder auftretende Schwingungen während des Betriebes, beeinträchtigt wird. Auch wenn die Kältezentrale, wie auch andere Gebäude-technikzentralen, meist im Untergeschoss untergebracht ist, und diese zusätzlichen Lasten deshalb selten ein statisches Problem zur Folge haben, ist eine Betrachtung dieser Fragestellung dennoch zwingend durchzuführen.

Ein weiteres, nicht unerhebliches Auswahlkriterium ist der Denkmalschutz. Für die Rückkühlung der Kältemaschinen, die überwiegend über Kühltürme realisiert wird, und auch für die Kälteerzeugung durch Free Cooling, ist es häufig nötig, einen Kühlurm ausserhalb der Gebäudehülle aufzustellen. Steht das Gebäude allerdings unter Denkmalschutz, oder sind städtebauliche Anforderungen an die Gestaltung des Gebäudes gestellt, dann ist die Aufstellung von Kühlürmen nur unter stark erschwer-ten Rahmenbedingungen realisierbar. Außerdem dürfen dann auch andere, das Erscheinungsbild des Gebäudes verändernde Massnahmen, nicht durchgeführt werden.

4.3.2 Ausgewählte Erzeugersysteme

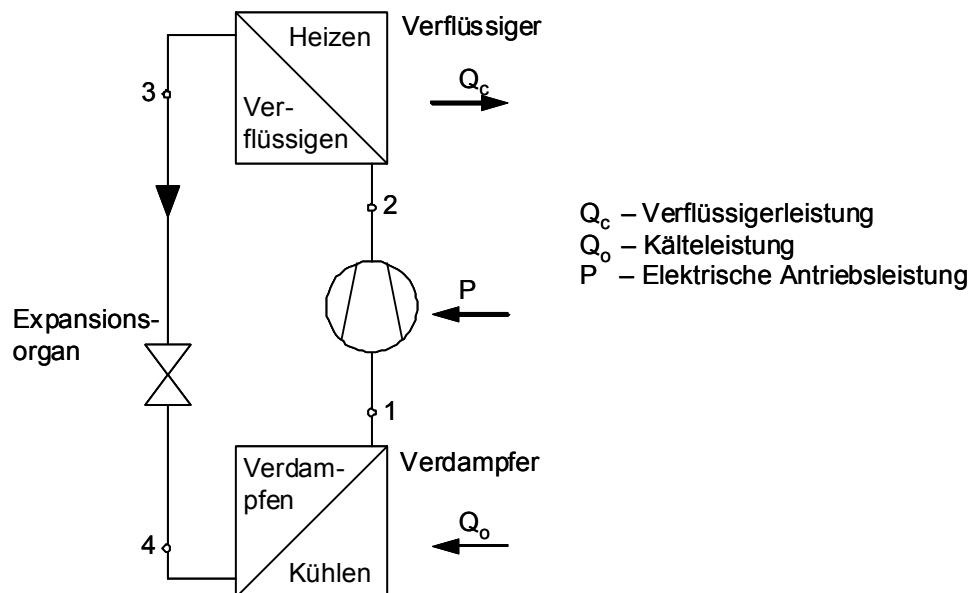
Kältemaschine

Die Kälteerzeugung mit einer Kältemaschine erfolgt in einem thermodynamischen Kreisprozess nach dem Prinzip des „linksläufigen Carnot-Kälteprozesses“ [1→2: isentrope Verdichtung des Dampfes (Vedichter); 2→3: isobare Abgabe der Wärme an das Kühlmittel Wasser oder Luft (Verflüssiger); 3→4: isenthalpe Entspannung des zunächst flüssigen Kältemittels (Entspannungsorgan); 4→1: isobare/isotherme Verdampfung des Kältemittels (Verdampfer)]. Unter Zuführung elektrischer Energie wird dem Kältemittel im Verdampfer Wärme entzogen, um dieses auf ein niedrigeres Temperaturniveau zu bringen. Die Kaltdampf-Kompressionskältemaschine (KD-KK) ist mit ca. 90 % aller installierten Geräte die am häufigsten eingesetzte Kältemaschine. Die Kältemittel, die bei KD-KK eingesetzt werden, ändern bei den Arbeitstemperaturen der Kompressionskältemaschine den Aggregatzustand zwischen Dampfphase und Flüssigkeitsphase.

Die Bestandteile einer KD-KK sind im Wesentlichen:

- Verdampfer zur Wärmeaufnahme (Kühlung)
- Verdichter mit Antriebsmotor zur Energiezufuhr
- Verflüssiger zur Wärmeabgabe
- Entspannungseinrichtung zur Absenkung des Druckes.

Die Kälteleistung und der Energieverbrauch sind im Wesentlichen von der Grösse des eingesetzten Verdichters abhängig [10].



Q_c – Verflüssigerleistung
 Q_o – Kälteleistung
P – Elektrische Antriebsleistung

Figur 18: Schematische Darstellung einer Kompressionskältemaschine, nach [10]

| Typ | Kälteleistung [kW] | Kaltwasser- temperatur [°C] | Rückkühlung | Kühlwasser- temperatur [°C] | Regelung |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------------------------------|-----------|
| R134a Hubkolbenverdichter | 75 | 18/22 | Direktverflüssigung | - | 4-Stufig |
| R134a Hubkolbenverdichter | 75 | 18/22 | Trocken | 32/38 | 4-Stufig |
| R134a Hubkolbenverdichter | 75 | 18/22 | Hybrid | 23/29 | 4-Stufig |
| R134a Turboverdichter | 255 | 18/22 | Trocken | 32/38 | Stufenlos |
| R134a Turboverdichter | 255 | 18/22 | Hybrid | 23/29 | Stufenlos |

Tabelle 7 Kenndaten der untersuchten Kältemaschinen mit Rückkühlung

| Typ | Kälteleistung | $\text{kWh}_{\text{Th}}/\text{kWh}_{\text{El}}^1$ | Wasserbedarf Rückkühlung |
|---|---------------|---|--|
| | [kW] | [-] | $\text{l/kWh}_{\text{Kälteproduktio}}$ |
| R134a Hubkolbenverdichter Direktverflüssigung | 75 | 5 - 9 | - |
| R134a Hubkolbenverdichter + RK Trocken | 75 | 5 - 8 | - |
| R134a Hubkolbenverdichter + RK Hybrid | 75 | 7 - 12 | 2 - 3 |
| R134a Turboverdichter + RK Trocken | 255 | 7 - 11 | - |
| R134a Turboverdichter + RK Hybrid | 255 | 9 - 15 | 2 - 3 |

1: Der Elektrizitätsbedarf beinhaltet auch den Bedarf des Rückkühlers jedoch nicht den Bedarf für die allfällige Wasseraufbereitung

Tabelle 8 Bedarfsberechnung der untersuchten Kältemaschinen mit Rückkühlung

| Typ | Kälteleistung | Investitions- kosten ¹ Kältemaschine | Investitions- kosten ¹ Rückkühler | Elektrizitäts- kosten ² | Wasserkosten ³ |
|---|---------------|---|--|---------------------------------------|-----------------------------------|
| | [kW] | [CHF/ m^2_{BF}] | [CHF/ m^2_{BF}] | [CHF/ m^2_{BFA}] | [CHF/ m^2_{BFA}] |
| R134a Hubkolbenverdichter Direktverflüssigung | 75 | 15 - 25 | 5 - 15 | 0.4 - 0.6 | - |
| R134a Hubkolbenverdichter + RK Trocken | 75 | 15 - 25 | 10 - 20 | 0.4 - 0.6 | - |
| R134a Hubkolbenverdichter + RK Hybrid | 75 | 15 - 25 | 30 - 50 | 0.2 - 0.4 | 0.2 - 0.3 |
| R134a Turboverdichter + RK Trocken | 255 | 10 - 15 | 5 - 15 | 0.3 - 0.5 | - |
| R134a Turboverdichter + RK Hybrid | 255 | 10 - 15 | 15 - 25 | 0.2 - 0.3 | 0.2 - 0.3 |

1: Die Investitionskosten verstehen sich inkl. Leitungen zwischen KKM und RK, Armaturen und Steureung, ohne MWST, gegebenenfalls ohne Wasseraufbereitung (Hybrid).

angenommen.

Beide Tarife bilden ein Richtwert, Leistungspreise und MWST sind nicht eingerechnet.

3: Kosten für Zürich inkludiert Angenommen Wasserbedarf 100% Frischwasser, 1.44 Fr/ m^3 + Leistungsgebühr 50 Fr pro m^3/h + Zuschlag Klimanutzung 80 Fr pro l/min
BF= Gekühlte Bodenfläche (Kälteleistung 30 W/ m^2)

Tabelle 9 Kostenauswertung der untersuchten Kältemaschinen mit Rückkühlung

Vorteile:

- Keine Anforderungen an den Gebäudestandort, da elektrische Energie überall bezogen werden kann

Nachteile:

- grosser Platzbedarf und hohe statische Lasten je nach geforderter Kühlleistung
- Notwendigkeit einer Rückkühlung (meist durch Kühlturn realisiert)

Fernwärme und Absorptionskältemaschine

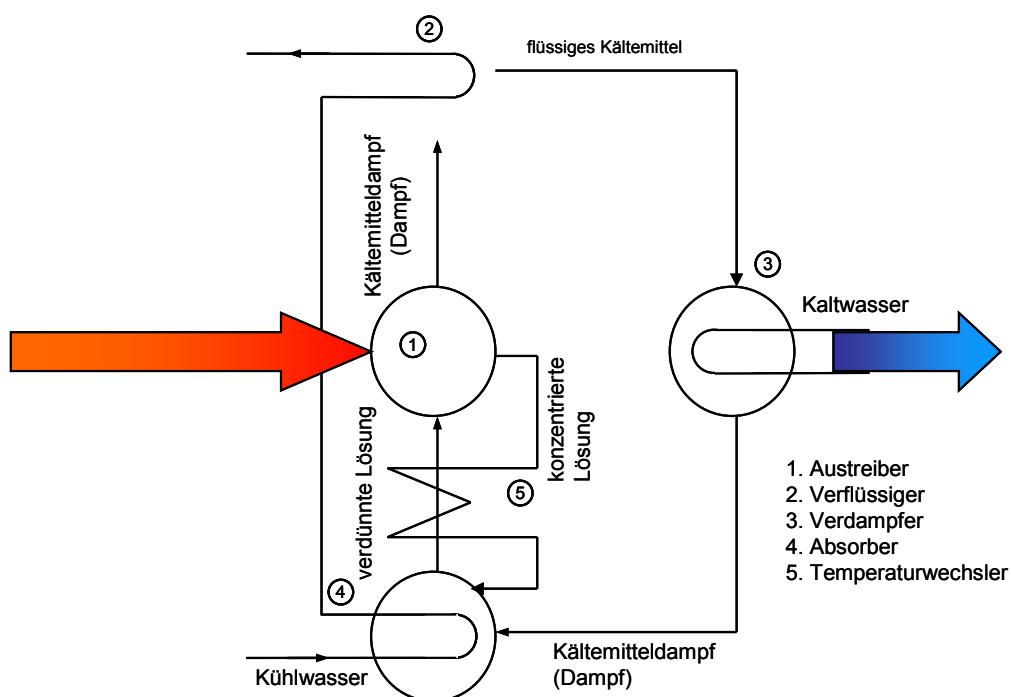
Bei der mit Fernwärme kombinierten Absorptionskältemaschine erfolgt die Energieversorgung zur Kälteerzeugung mittels Fernwärme über ein Fernwärmennetz. Der Unterschied zu üblichen Kompressionskältemaschinen besteht darin, dass bei einer Absorptionskältemaschine im Wesentlichen (Fern-)Wärme als Antriebsenergie genutzt wird, und nicht wie üblich elektrischer Strom als Antriebsenergie nötig ist. Beim Prozess der Absorption geht Wasserdampf in hygroskopischen Flüssigkeiten in Lösung. Die Regeneration dieser Flüssigkeiten erfolgt durch Erwärmung. Zu beachten ist die hohe notwendige Rückkühlleistung.

Solarenergie als Antriebsenergie

Als Antriebsenergie kann auch thermische Solarenergie genutzt werden. Die relativ hohen geforderten Antriebstemperaturen (80-100°C), sind bei der Auslegung des Systems speziell zu beachten. Zu grosse Schwankungen in Antriebstemperatur erschweren den Anlagenbetrieb, es kann zu Abschaltungen der Kältemaschine kommen. Gerade bei Sanierungen, wo die Räumlichkeiten für Technik häufig gegeben sind, sollte speziell darauf geachtet werden, dass die Leitungsverluste zwischen Solaranlage und Kältemaschine nicht zu gross werden. Sorgfalt ist auch bei der Auslegung der Rückkühlung gefragt. Ein Hersteller bietet für kleinere Leistungen solargetriebene Absorptionskältemaschinen zusammen mit einer abgestimmten Rückkühlung an.

Bauliche Integrierbarkeit

Bedingung für den Einsatz des Systems der Absorptionskältemaschine, die mit Fernwärme angetrieben wird, ist die Anschlussmöglichkeit an ein bestehendes Fernwärmennetz. Zusätzlich muss genügend Fläche für die Rückkühlung zur Verfügung stehen.



Figur 19: Fernwärme mit Absorptionskältemaschine

Kennwerte und Auswertungen

| Kälteleistung [kW] | Kaltwasser-temperaturen [°C] | Rückkühl-leistung [kW] | Kühlwasser-temperaturen [°C] | Heiz-leistung [kW] | Heisswasser-temperaturen [°C] | Regelung |
|-----------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------------|-----------------------|----------------------------------|----------|
| 75 | 18/22 | 188 | 31/35 | 113 | 95/90 | ON/OFF |
| 255 ¹ | 18/22 | 638 | 31/35 | 383 | 95/90 | ON/OFF |
| 660 | 18/22 | 1650 | 30/38.7 | 990 | 115/92.4 | 20-100% |

1: Zwei Absorptionskältemaschinen in Modulen

Tabelle 10 Kennwerte von Absorptionskältemaschinen verschiedener Grösse

| Typ | Kälteleistung [kW] | COP _{Th} [-] | COP _{Ei} ² [-] | Investitions-kosten ³ Kältemaschine [CHF/m ² _{BF}] | Investitions-kosten ⁴ Rückkühlung [CHF/m ² _{BF}] | Energie-kosten ⁵ [CHF/m ² _{BFa}] | Wasser-kosten ⁶ [CHF/m ² _{BFa}] |
|-------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------------------|--|--|---|--|
| AKM RK Trocken | 75 | 0.7 | 14 | 15 – 30 | 20 – 35 | 0.9 – 1.5 | |
| AKM RK Hybrid | 75 | 0.7 | 14 | 15 – 30 | 50 – 85 | 0.9 – 1.5 | 0.6-1.0 |
| AKM RK Trocken | 255 ¹ | 0.7 | 14 | 10 -20 | 15 – 25 | 0.9 – 1.5 | |
| AKM RK Hybrid | 255 ¹ | 0.7 | 14 | 11 -20 | 30 - 55 | 0.9 – 1.5 | 1.2-2.0 |
| AKM RK Hybrid | 660 | 0.7 | 14 | 5-10 | 30 - 55 | 0.8 – 1.3 | 1.2-2.0 |

1: Zwei Absorptionskältemaschinen in Modulen

2: Der Strombedarf für Rückkühlung und Kältemaschine wurde mit 7% der Kältemenge geschätzt gem. [13]

3: Inkludiert einzig die Absorptionskältemaschine inkl. Inbetriebnahme, ohne MWST.

4: Ohne allfällige Wasseraufbereitung, inkl. Steuerung, ohne MWST

5. Die Energiekosten stellen sich aus Wärmeenergiekosten, 2.6 Rp/kWh ewb Bern, Sommertarif maj-okt [14], und Elektrizitätskosten, ewz Tarif B Naturpower, HT:15 Rp/kWh, NT:8 Rp/kWh. Es wurde 70% HT und 30% NT angenommen. Leistungspreise und MWST nicht eingerechnet.

6: Wasserverbrauch geschätzt mit 4 kg/h pro kW RK-Leistung

Kosten für Zürich inkludiert angenommen Wasserbedarf 100% Frischwasser, 1.44 Fr/m³ + Leistungsgebühr 50 Fr pro m³/h + Zuschlag Klimanutzung 80 Fr pro l/min

BF= Gekühlte Bodenfläche (Kälteleistung 30 W/m²)

Tabelle 11 Auswertungen von Absorptionskältemaschinen verschiedener Grösse

Die hier vorgestellten Maschinen arbeiten mit Wasser als Kältemittel und Lithiumbromid als Lösungsmittel.

Vorteile:

- System ist wartungsarm und umweltfreundlich

Nachteile:

- grösserer Kühlurm zur Rückkühlung erforderlich als bei Kompressionskältemaschinen wegen der höheren Abwärme beim Absorptionskälteprozess

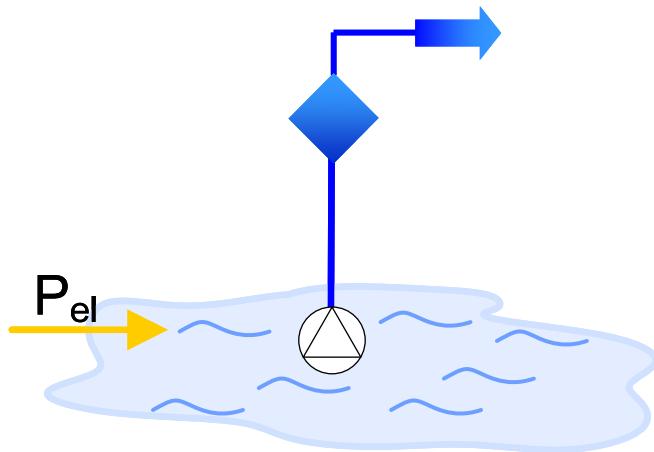
- gem. [15] ist es bei einem Antrieb mit Fernwärme schwierig eine Wirtschaftlichkeit zu erreichen, wenn die Fernwärme nicht sehr günstig ist, oder durch Prozesse im gleichen Betrieb (gratis) erzeugt wird.

4.3.3 Seewasser

Kaltes Seewasser wird aus ca. 10 m bis 20 m Tiefe gefördert und im Kühlbetrieb an einem Wärmetauscher vorbeigeführt. Der Sekundärkreis des Wärmetauschers ist der Kaltwasserkreislauf.. Anschliessend wird das Seewasser mit einer gering erhöhten Temperatur zurück in den See gepumpt. Im Heizbetrieb wird dem Seewasser in einer entsprechenden Wärmepumpenzentrale Wärmeenergie entzogen. Im Anschluss wird es mit einer niedrigeren Temperatur in einem zweiten Kreislauf zurück in den See gepumpt. Da die Temperaturschwankungen des tiefen Seewassers über das Jahr nicht so hoch sind, kann mit einem grösseren Anteil an Freecooling als bei der Flusswasserkühlung gerechnet werden. Die Spitzenlasten müssen häufig mit einer Kältemaschine abgedeckt werden; hier kann das Seewasser auch als Rückkühlung dienen.

Bauliche Integrierbarkeit

Für die Kälteerzeugung durch Seewasser oder durch Flusswasser ist es Voraussetzung, dass ein geeignetes Gewässer in erreichbarer Nähe liegt und eine Verlegung der Wasserleitungen zwischen Entnahmestelle und Gebäude bzw. Wärmetauschern möglich ist. Wenn diese Bedingung erfüllt ist, muss abgeklärt werden, ob das Gewässer in einem Wasserschutzgebiet liegt. Des Weiteren sollte in Erfahrung gebracht werden, ob eine Wasserentnahme mit anschliessendem Zurückpumpen mit erhöhter Temperatur aus wasserschutzrechtlichen Gründen gestattet ist. Diese Abklärungen müssen individuell erfolgen und eine allgemeingültige Aussage darüber kann nicht getroffen werden.



Figur 20: Seewasserkühlung

Vorteile:

- Möglichkeit eines Heizbetriebs zusätzlich zum Kühlbetrieb
- Wenn als Rückkühlung eine Kältemaschine verwendet wird, kann auf einer Rückkühlung auf dem Dach verzichtet werden. Dies ist für unter Denkmalschutz stehende Gebäude wichtig.

Nachteile:

- Im Sommer höhere Wassertemperaturen durch Erwärmung des Gewässers
- Nähe zu einem geeigneten Gewässer erforderlich

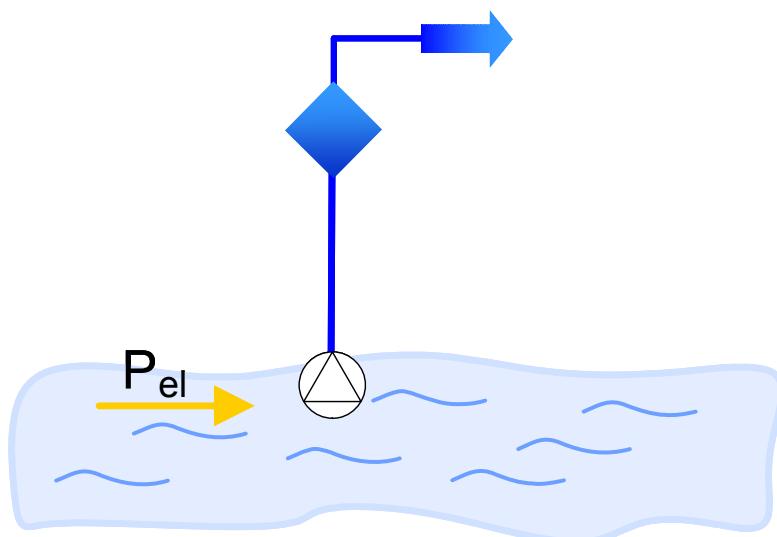
4.3.4 Flusswasser

Bei der direkten Kälteerzeugung mittels Flusswasser wird die Temperatur des Flusswassers genutzt, um das Kaltwasser direkt auf die entsprechende Temperatur zu bringen, die für die Gebäudekühlung notwendig ist. Dafür wird Wasser mit einer Pumpe aus dem Fluss gefördert und an Wärmetauschern vorbeigeleitet. Über diese Wärmetauscher wird das Kaltwasser mit dem Flusswasser gekühlt. Anschliessend wird das Flusswasser mit einer höheren Temperatur wieder zurück in den Fluss gepumpt. Die Spitzenlasten müssen häufig mit einer Kältemaschine abgedeckt werden; hier kann das Fluss-

wasser auch als Rückkühlung dienen. Um Flusswasser zu Heizzwecken nutzen zu können, wird es in eine Wärmepumpenzentrale gefördert, in der ihm Wärmeenergie entzogen wird. Im Anschluss wird das abgekühlte Flusswasser ebenfalls zurück in den Fluss gepumpt. Dabei sind die Anforderungen der Gewässerschutzverordnung bezüglich Wärmeeintrag in Fliessgewässer im konkreten Fall zu berücksichtigen.

Bauliche Integrierbarkeit

Für die Kälteerzeugung durch Seewasser oder durch Flusswasser ist es Voraussetzung, dass ein geeignetes Gewässer in erreichbarer Nähe liegt und eine Verlegung der Wasserleitungen zwischen Entnahmestelle und Gebäude bzw. Wärmetauschern möglich ist. Wenn diese Bedingung erfüllt ist, muss abgeklärt werden, ob das Gewässer in einem Wasserschutzgebiet liegt. Des Weiteren sollte in Erfahrung gebracht werden, ob eine Wasserentnahme mit anschliessendem Zurückpumpen mit erhöhter Temperatur aus wasserschutzrechtlichen Gründen gestattet ist. Diese Abklärungen müssen individuell erfolgen und eine allgemeingültige Aussage darüber kann nicht getroffen werden.



Figur 21: Flusswasserkühlung

Vorteile:

- Möglichkeit eines Heizbetriebs zusätzlich zum Kühlbetrieb (Prinzip siehe Grundwasser)
- Wenn als Rückkühlung eine Kältemaschine verwendet wird, kann auf eine Rückkühlung auf dem Dach verzichtet werden. Dies ist für ein unter Denkmalschutz stehendes Gebäude wichtig.

Nachteile:

- Höhere Temperaturen als Seewasser
- Einsatzgrenzen infolge Erwärmung im Sommer (z. B. Erwärmung der Limmat auf ~20°C möglich)
- Nähe zu einem Fluss erforderlich und Förderung des Flusswassers nicht immer problemlos möglich

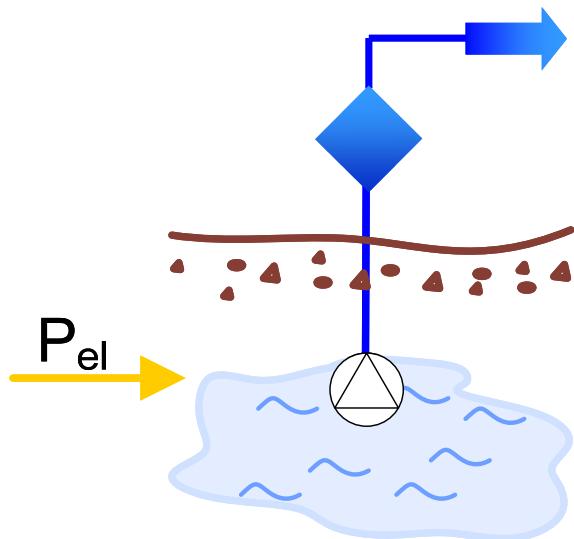
4.3.5 Grundwasser

Bei der Kälteerzeugung mittels Grundwasser wird dem Erdreich über Tauchpumpen aus einem Förderbrunnen (Saugbrunnen) Grundwasser entnommen und an einem Wärmetauscher vorbeigeführt. Über diese Wärmetauscher wird das Kaltwasser mit dem Grundwasser gekühlt.. Anschliessend wird das gering erwärmte Grundwasser über einen Schluckbrunnen zurück ins Erdreich geführt. Wie bei der Kälteerzeugung mittels Seewasser (vgl. Seewasser) kann auch mit Grundwasser geheizt werden. Dafür wird dem Grundwasser in einer Wärmepumpenzentrale Wärmeenergie entzogen.

Bauliche Integrierbarkeit

An die Kälteerzeugung durch Grundwasser bzw. die Nutzung von Geothermie (vgl. Erdsonde/ Erdregister) werden im Vergleich die höchsten standortbezogenen Anforderungen gestellt, da hierfür Bohrungen oder zumindest Tiefbauarbeiten in grösserem Umfang in unmittelbarer Nähe des bestehenden

Gebäudes durchgeführt werden müssen. Bei der Grundwassernutzung sollten im Vorfeld zusätzlich Sondierungsbohrungen gesetzt werden, um abzuklären, ob die Grundwasserverhältnisse überhaupt für eine Nutzung geeignet sind (Lage der Grundwasseraquifer, Fließgeschwindigkeit und -richtung des Grundwassers, Wassertemperatur, etc.). Zusätzlich muss sowohl bei der Nutzung von Geothermie als auch bei der Nutzung des Grundwassers als Wärmesenke die Frage geklärt werden, ob die Nutzung wasserschutzrechtlichen bzw. bergbaurechtlichen Anforderungen unterliegt. Wenn grundsätzlich eine Nutzung dieser Wärmesenken möglich ist, dann stellt sich noch die Frage der Durchführung der Erdsondenbohrungen für Grundwasserförderung bzw. Geothermienutzung. Bei Erdsonden ist der eigentliche Platzbedarf für die Sonden weniger ein Problem als vielmehr der Platz, der erforderlich ist, um die Bohrungen durchführen zu können. Daraus ergibt sich, dass die Nutzung von Geothermie oder Grundwasserkälte nur unter besonderen Umständen möglich ist, und ausreichend freie Fläche, zumindest temporär, zur Verfügung stehen muss. Im Vergleich zur alternativen Wassernutzung (Fluss-/ Seewasser) unterliegen Erdsonden, sowohl zur Grundwasserzirkulation als auch zur Geothermienutzung, sehr hohen wasserschutzrechtlichen Anforderungen. Die Einholung einer Genehmigung ist hierbei unumgänglich.



Figur 22: Grundwasserkühlung

Kennzahlen und Auswertungen

| | $\text{kWh}_{\text{Th}} / \text{kWh}_{\text{El}}$ [-] | Kälte- bedarf [kWh/m ² BFa] | Elektrizitäts- bedarf [kWh/m ² BFa] | Grundwasser- menge [m ³ /m ² BF a] |
|----------------------------|--|--|--|--|
| Freecooling Grundwasser | 15 - 25 | 21.0 | 1.0 - 1.5 | 2.5 - 4.5 |

Tabelle 12 Kennzahlen einer Grundwasseranlage

| | Investitionskosten ¹ [CHF/m ² BF] | | | Elektrizitäts- kosten ² [CHF/m ² BF a] | Grundwasser- kosten Nutzungsgebühr ³ [CHF/m ² BF a] |
|----------------------------|--|--------|--------|--|--|
| | 75 kW | 225 kW | 660 kW | | |
| Freecooling Grundwasser | 10 - 15 | 5 - 10 | 5 - 10 | 0.1 - 0.2 | 0.5 - 0.9 |

1. Aufteilung der Investitionskosten auf Heizen und Kühln aufgrund der benötigten Energien. Gezeigt werden die Kosten für den Kühlfall

2. Elektrizitätsskosten, ewz Tarif B Naturpower, HT:15 Rp/kWh, NT:8 Rp/kWh. Es wurde 70% HT und 30% NT angenommen. Beide Tarife bilden ein Richtwert, Leistungspreise und MWST sind nicht eingerechnet.

3. Kosten für Kanton Basel Stadt

BF= Gekühlte Bodenfläche (Kälteleistung 30W/m²)

Tabelle 13 Kostenauswertung einer Grundwasseranlage

Vorteile:

- über den gesamten Jahresverlauf nahezu konstante Wassertemperaturen von ca. 8 °C bis ca. 12 °C
- hohe Effizienz, da selbst in warmen Sommern/ kalten Wintern die Grundwassertemperatur stabil ist
- Möglichkeit eines Heizbetriebs zusätzlich zum Kühlbetrieb

Nachteile:

- Nachhaltige Erwärmung des Grundwassers
- Günstiger (Bohr)Untergrund nicht immer gegeben
- Ausreichend freie Fläche für die Bohrung erforderlich (nur schwer in dicht besiedelten Gebieten realisierbar)

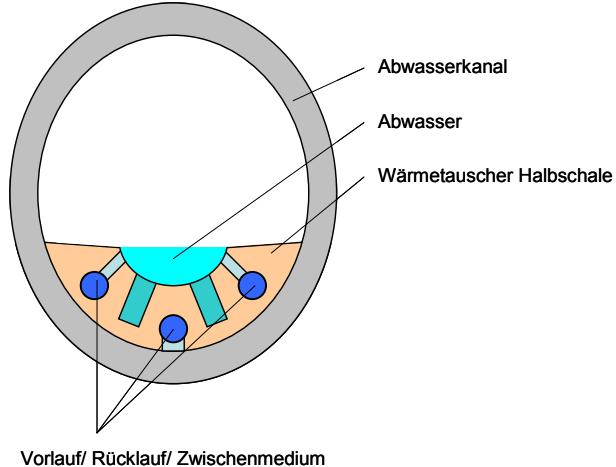
4.3.6 Abwasser

Das Herzstück von Erzeugersystemen, die zum Kühlen mit Abwasserwärme eingesetzt werden, bildet ein Wärmetauscher, der in die Sohle eines Abwasserkanals oder in den Abwasserkanal selber eingebaut wird. Neu entwickelte Wärmetauscher können auch ausserhalb des Kanals platziert werden. Bei der Kälteerzeugung gibt das Abwasser über diese Wärmetauscher seine Kälteenergie an das in einem zweiten Kreislauf zirkulierende Kaltwasser ab. Ein Mindestabfluss bei Trockenwetter von ca. 15 l/s muss gewährleistet sein und zu hohe Rücklauftemperaturen in den Kanal sollen vermieden werden, damit die biologische Reinigung der Kläranlage, die nur geringe Temperaturtoleranzen aufweist, erhalten bleibt. Zudem sind die Anforderungen der Gewässerschutzverordnung bezüglich Wärmeeintritt in Fließgewässer im konkreten Fall zu berücksichtigen. Übliche Temperaturdifferenzen zwischen Vorlauf (VL) und Rücklauf (RL) liegen bei 4 K bis 6 K. Auch hier ist ein Heizbetrieb möglich. Dafür wird die Abwassertemperatur über Wärmetauscher an einen zweiten Wasserkreislauf abgegeben, der zu einer (Abwasser) Wärmepumpe führt. Dort wird dem Wasser Wärmeenergie entzogen. Zu niedrige Temperaturen im Kanal sollen auch hier aufgrund der biologischen Reinigungsstufe der Kläranlage vermieden werden.

Bauliche Integrierbarkeit

Die Kühlung mittels Abwassers (vgl. Abwasser) hat eine ähnliche Anforderung an den Standort des Gebäudes wie die Kühlung mit See- bzw. Flusswasser. Bei der Abwasserkühlung muss jedoch ein geeigneter, grosser Abwasserkanal erreichbar sein. Hierbei sollte die Entfernung zwischen Gebäude und Kanal in überbauten Gebieten 300 m nicht überschreiten, in unüberbauten Gebieten kann die Entfernung bis zu 1000 m betragen. Zu bemerken ist dazu, dass mit der Höhe der Bebauungsdichte die Wirtschaftlichkeit der Nutzung von Abwasserkühlung steigt. Anschliessend sind noch Abklärungen mit den Betreibern des Klärwerks vorzunehmen, inwieweit durch den Einsatz von Wärmetauschern im Kühlbetrieb dem Abwasser Wärme hinzugefügt werden darf. Eine geänderte Abwassertemperatur bedeutet ein verändertes Klima für die Bakterien im Klärprozess. Da die Bakterien relativ empfindlich

auf Temperaturschwankungen reagieren, muss vor Inbetriebnahme der Abwasserwärmetauscher der zulässige Temperaturbereich beim Klärwerk in Erfahrung gebracht werden.



Figur 23: Abwasserkühlung

Vorteile:

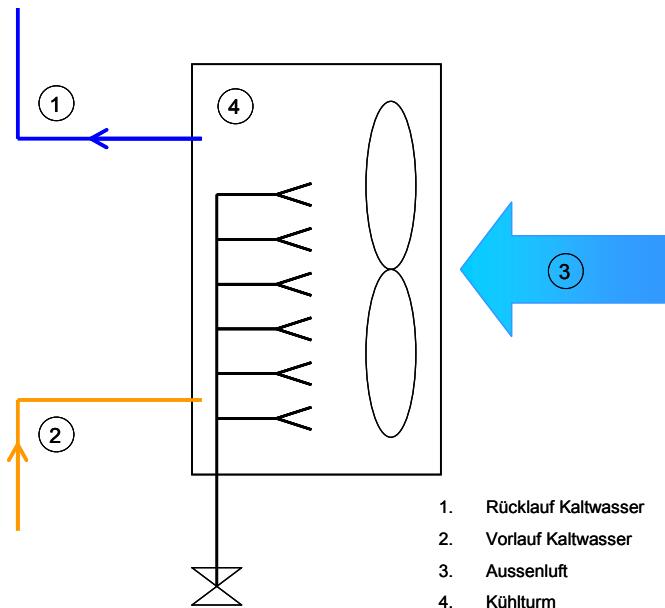
- sowohl Kühlfunktion als auch Heizfunktion

Nachteile:

- Zugänglichkeit zu einem geeigneten Abwasserkanal (Trockenwetterabfluss > 15 l/s)
- Notwendigkeit eines hohen Abwasserflusses

4.3.7 Hybriddrückkühler

Der Hybriddrückkühler kann bei geeigneten Randbedingungen als Kälteerzeuger eingesetzt werden. Das Kaltwasser zirkuliert in einem geschlossenen Kreislauf zwischen Raum und Kühlurm. Im Raum wird das Kaltwasser durch Abführung der Kältelasten erwärmt. Das erwärmte Kaltwasser wird im Kühlurm durch einen Wärmetauscher geleitet. Kalte Außenluft wird mit Hilfe eines Ventilators in den Kühlurm gesaugt und dort ebenfalls durch den Wärmetauscher geleitet. Dem Kaltwasser wird somit Wärme entzogen und es wird wieder zurück in den Raum geführt. Eine Erhöhung der Kühlleistung kann durch Besprühen des Wärmetauschers mit Wasser erreicht werden. Das aufgesprühte Wasser verdunstet und entzieht dem Kaltwasser zusätzlich Wärmeenergie durch Verdunstungskühlung. Wesentlich für die Bewertung eines Hybriddrückkühler ist der Wasserverbrauch.



Figur 24: Freecooling mit Aussenluft

Kennzahlen und Auswertungen

Ein hybrider Rückkühler der als Kälteerzeuger dient, kann in den seltensten Fällen die ganze Kühlleistung eines Betriebs gewährleisten. Er wird sehr häufig mit einer Kältemaschine oder reversibler Wärmepumpe kombiniert. Kenndaten für Gesamtsysteme mit hohem Anteil Freecooling sind unter Kompressionskältemaschine und unter Messprojekt Rehalp zu finden.

Vorteile:

- Luft als Kühlmedium ist überall in ausreichendem Mass verfügbar
- Luft steht kostenfrei zur Verfügung
- Keine besondere Anforderungen an den Standort

Nachteile:

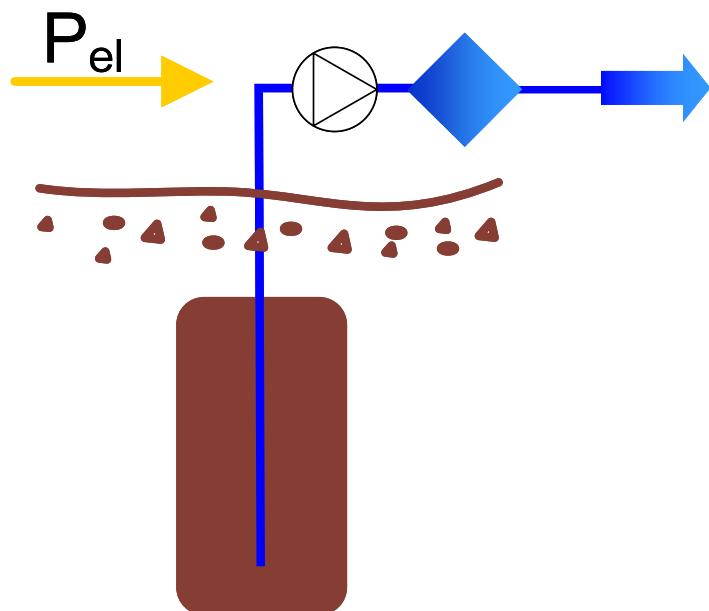
- In den meisten Fällen ist eine Wasseraufbereitung notwendig
- Bei Aussentemperaturen über ~18 °C nicht mehr realisierbar (Mindesttemperaturdifferenz zwischen Raum- und Aussenluft muss vorhanden sein)
- Im Sommer hauptsächlich im Nachtbetrieb zu fahren (aufgrund der niedrigeren Aussentemperaturen)
- Bei hohen Aussenluftfeuchten funktioniert der Kühlprozess nicht mehr

4.3.8 Erdsonde/ Erdregister

Die Anlage zur Kühlung mit Erdsonde/ Erdregister besteht aus dem Erdkollektor bzw. der Erdsonde und einem Wärmetauscher. In einem geschlossenen Kreislauf wird die Sole (Wasser/ Frostschutz-Gemisch) durch den Erdkollektor/ die Erdsonde gepumpt. Während dieses Vorgangs nimmt die Sole die Temperatur der Erde an, die dann über einen Plattenwärmetauscher an das Kaltwasser übertragen wird. Soll im Winter, zusätzlich zum sommerlichen Kühlbetrieb, mit Erdwärme geheizt werden, so ist die Installation einer Wärmepumpe notwendig. Die Wärmepumpe entzieht der Sole Wärmeenergie, die dann auf ein höheres Temperaturniveau gebracht wird.

Bauliche Integrierbarkeit

An die Kälteerzeugung durch Grundwasser (vgl. Grundwasser) bzw. die Nutzung von Geothermie werden im Vergleich die höchsten standortbezogenen Anforderungen gestellt, da hierfür Bohrungen oder zumindest Tiefbauarbeiten in grösserem Umfang in unmittelbare Nähe des bestehenden Gebäudes durchgeführt werden müssen. Erdsonden sind „Pfähle“, die bis zu einigen hundert Metern in die Tiefe gebohrt werden, um Tiefengeothermie zu nutzen. Die Auslegungsgrösse bei Erdsonden ist neben der Anzahl der Sonden auch deren Bohrtiefe. Erdregister sind Systeme, die auf einer grossen Fläche oberflächennah im Boden verlegt werden. Erdregister nutzen demnach die oberflächennahe Geothermie. Die Auslegungsgrösse hierbei ist die Fläche. Zusätzlich muss sowohl bei der Nutzung von Geothermie als auch bei der Nutzung des Grundwassers als Wärmesenke die Frage geklärt werden, ob die Nutzung wasserschutzrechtlichen bzw. bergbaurechtlichen Anforderungen unterliegt. Wenn grundsätzlich eine Nutzung dieser Wärmesenken möglich ist, dann stellt sich noch die Frage der Durchführung der Erdsondenbohrungen für Grundwasserförderung bzw. Geothermienutzung. Der Einsatz von Erdregistern erfordert im Vergleich zu Erdsonden einen höheren Platzbedarf. Befindet sich das Bestandsgebäude in einem dicht bebauten Gebiet ohne oder mit nur wenigen freien Flächen, dann ist es schwierig den erforderlichen Flächenbedarf für die Erdregister aufbringen zu können. Bei Erdsonden ist der eigentliche Platzbedarf für die Sonden weniger ein Problem als vielmehr der Platz, der erforderlich ist, um die Bohrungen durchführen zu können. Daraus ergibt sich, dass die Nutzung von Geothermie oder Grundwasserkälte nur unter besonderen Umständen möglich ist, und ausreichend freie Fläche, zumindest temporär, zur Verfügung stehen muss. Im Vergleich zur alternativen Wassernutzung (Fluss-/ Seewasser) unterliegen Erdsonden, sowohl zur Grundwasserzirkulation als auch zu Geothermienutzung, sehr hohen wasserschutzrechtlichen Anforderungen. Die Einholung einer Genehmigung ist hierbei unumgänglich.



Figur 25: Kühlung mit Erdsonde/ Erdregister

Kennzahlen und Auswertungen

| | kWh _{Th} / kWh _{El} [-] | Kältebedarf [kWh/m ² _{BFa}] | Elektrizitätsbedarf [kWh/m ² _{BFa}] |
|--------------------------|--|---|---|
| Freecooling Erdsonden | 8 - 18 | 21.0 | 1.2 - 2.6 |

BF= Gekühlte Bodenfläche (Kälteleistung 30W/m²)

Tabelle 14 Kennzahlen einer Erdsondenanlage

| | Investitionskosten ¹ [CHF/m ² _{BF}] | | | Elektrizitätskosten ² [CHF/m ² _{BF a}] |
|--------------------------|--|---------|---------|---|
| | 75 kW | 225 kW | 660 kW | |
| Freecooling Erdsonden | 15 - 25 | 15 - 25 | 10 - 20 | 0.2 - 0.4 |

1. Aufteilung der Investitionskosten auf Heizen und Kühlung aufgrund der benötigten Energien. Gezeigt werden die Kosten für den Kühlfall.

2. Elektrizitätsskosten, ewz Tarif B Naturpower, HT:15 Rp/kWh, NT:8 Rp/kWh. Es wurde 70% HT und 30% NT angenommen. Beide Tarife bilden ein Richtwert, Leistungspreise und MWST sind nicht eingerechnet.

BF= Gekühlte Bodenfläche (Kälteleistung 30W/m²)

Tabelle 15 Kostenauswertung einer Erdsondenanlage

Vorteile:

- Möglichkeit eines Heizbetriebs zusätzlich zum Kühlbetrieb
- grosse Arbeitszahl
- geringe Betriebskosten

Nachteile:

- relativ hohe Investitionskosten
- Vorhandensein eines geeigneten Untergrundes erforderlich

4.3.9 Desiccant Cooling / Sorptionsgestützte Klimatisierung

Desiccant Cooling (DEC) zählt zur Gruppe der Luftkühlungssysteme. DEC beschreibt einen Trocknungs- und Verdunstungskühlungsprozess, der dem Prinzip des offenen Kühlprozesses folgt. Mit dieser Methode kann die Luft entfeuchtet und gleichzeitig gekühlt werden, ohne dass der Einsatz einer Kältemaschine notwendig wird. Die Bereitstellung konditionierter Luft erfolgt ohne Wasser, eine Potentialerhöhung der Verdunstungskühlung wird durch eine vorangeschaltete Luftentfeuchtung möglich. Die Regenerierung des Sorptionsmittels erfolgt durch Wärme. Feste oder flüssige Sorptionsmittel können eingesetzt werden. Der am häufigsten verwendete Prozess benutzt ein Sorptionsrad, welcher entweder mit Silikagel oder Lithiumchlorid ausgestattet ist. Die Regenerationstemperaturen liegen im Bereich von 50-85°C [16]. Als Antriebsenergie kann z.B. Fernwärme, Prozessabwärme, Abwärme von Kältemaschinen oder Solarenergie genutzt werden.

Solarenergie als Antriebsenergie

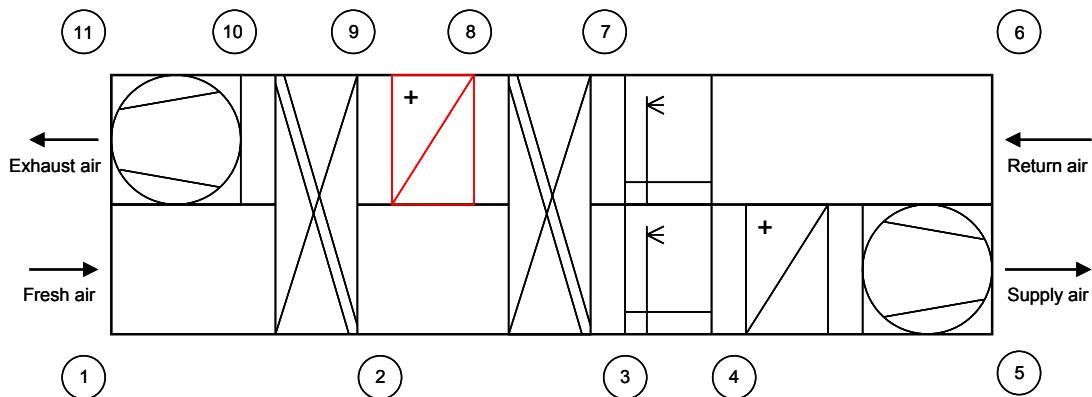
Als Antriebsenergie kann thermische Solarenergie genutzt werden, entweder durch Luftkollektoren oder Kollektoren mit flüssigen Wärmeträgern. Durch die relativ tiefe Regenerationstemperaturen können Flachkollektoren verwendet werden. Da ein besserer Wirkungsgrad der Entfeuchtung mit etwas höheren Temperaturen erzeugt werden kann, ist aber der Einsatz von Vakuum-Röhren-Kollektoren

vorteilhaft. Wenn ein Bedarf zur Kühlung nicht vorhanden ist, ist es sinnvoll die solare Energie für die Warmwasseraufbereitung zu nutzen.

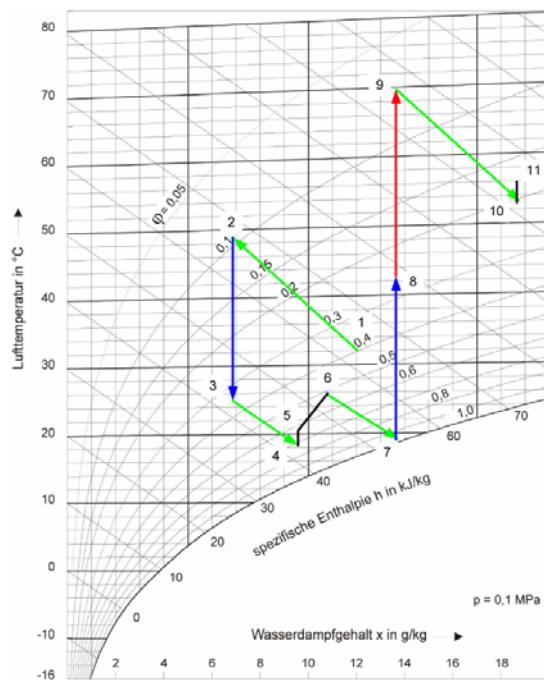
In Europa existieren zur Zeit wenige solarautarke Systeme. Häufig wird ein fossiler befeuerter Kessel (z.B. Gas) als Backup eingesetzt für den Fall, dass die solare Energie nicht ausreicht. Um bei einem solchen System einen primärenergietischen Vorteil gegenüber einer traditionellen Kälteerzeugung (Kompressionskältemaschine) zu erhalten, ist ein hoher solarer Deckungsbeitrag notwendig. Ein Solarspeicher ist unerlässlich, um Schwankungen bei den Lasten oder beim Solareintrag zu überbrücken. Manchmal wird auf der Kälteseite eine Kompressionskältemaschine als Backup eingesetzt [16]. Mit einem solarautarken System, welches kein Backup erfordert, ist es je nach Randbedingungen nicht möglich, strikte Raumkonditionen einzuhalten. Eine Übersicht realisierter Anlagen [17] zeigt, dass heute zwischen 8 und 10 m² Kollektorfläche pro 1000 m³/h installierter Lufteleistung üblich ist. In einem Messprojekt, im Rahmen des IEA Solar Heating & Cooling Programme, Task 25, wurden 11 Anlagen mit solargestützter Kühlung (Ad- und Absorptionskältemaschinen und DEC-Anlagen, mit flüssigem und festem Absorptionsmittel) ausgewertet. Die hydraulische Einbindung der Solarkollektoren erwies sich als kritisch. Einen höheren Planungsaufwand und eine längere Inbetriebnahme-Phase im Vergleich zu konventionellen Anlagen, hat sich als unabdingbar erwiesen, da die Systeme komplex sind.

Beschreibung des DEC-Zyklus

Ausgangspunkt ist die Aussenluft (1), die in einem Sorptionsgenerator entfeuchtet wird und sich dabei auf den Zustand (2) erwärmt. Die regenerative Wärmerückgewinnung führt zu einer Abkühlung des Zuluftstromes auf die Temperatur (3). In Abhängigkeit der geforderten Zulufttemperatur und -feuchtigkeit erfolgt im Befeuchter eine Temperaturabsenkung mit gleichzeitiger Feuchtigkeitszunahme bis zum Zustand (4). Der Heizer im Zuluftstrom braucht nur im Winterfall in Betrieb genommen werden. Die Ventilatorwärme, die zu einer im Sommer unerwünschten Temperaturerhöhung der Zuluft führt, realisiert den Zuluftzustand (5). In der Regel ist eine Temperatursteigerung von etwa 1 K zu erwarten. Daher ist auch besondere Sorgfalt auf die Auslegung des Ventilators zu legen, damit nicht mehr Wärme als unbedingt notwendig in den Luftprozess eingebracht wird. Nach erfolgter Raumzustandsänderung von (5) nach (6) wird die Abluft annähernd bis zum Sättigungszustand (7) befeuchtet, um ein möglichst grosses Temperaturpotential zur Wärme- bzw. Kälterückgewinnung zu erhalten. Die Wärmerückgewinnung von (7) nach (8) führt zu einer Anhebung der Temperatur des zugleich als Regenerationsluft genutzten Abluftstromes. Die Abluft wird anschliessend im Erwärmer nachgeheizt (9), um die Regeneration des Sorptionsgenerators von (9) nach (10) gewährleisten zu können." [11] Vergleiche dazu Figur 27.



Figur 26: Desiccant Cooling (DEC) [11]



Figur 27: Zustandsdiagramm DEC [11]

Kennwerte und Auswertungen

Durch die Komplexität des Systems und mangelnde allgemeingültigen Daten, ist es nicht möglich einen Energiekennzahlbereich anzugeben. Unten ist ein Investitionskosten-Beispiel dargestellt.

| Typ | Kälteleistung [W/m ² _{BF}] | Investitionskosten ¹ DEC Anlage [CHF/ m ² _{BF}] | Investitionskosten ^{1, 2} Solaranlage (8-10 m ² /1000 m ³ Luft) [CHF/m ² _{BF}] | Investitionskosten ^{1, 2} Solaranlage (Solarautark) [CHF/m ² _{BF}] |
|---|--|---|---|---|
| DEC Adsorptionsrad mit Lithiumchlorid | 6 | 36 - 53 | 22 - 37 | 35 - 47 |

Die Angaben basieren auf einer DEC Anlage ohne Verteilsystem mit 7000 m³/h. Die Anlage benötigt kein Nachkühler.

1: Die Investitionskosten verstehen sich ohne MWST, ohne Wasseraufbereitung

2: Die Kosten für die Solaranlage verstehen sich inkl. Verrohrung und Speicher.

BF= Belüftete Fläche (3 m³/hm²)

Tabelle 16: Kostenauswertung für DEC Anlage

Vorteile:

- Realisierung hoher Behaglichkeitsansprüche durch sorptive Entfeuchtung (adiabat)
- Möglichkeit der Kühlung ohne Kälteanlage
- Möglichkeit der Verminderung elektrischer Anschlussleistungen und Spitzenlasten durch Nutzung von Wärme (z. B. Abwärme, Solarthermie u.a.) zur Kühlung
- Trennung von Kühlung und Entfeuchtung ist möglich
- durch die niedrigen Regenerationstemperaturen sind preiswerte thermische Solarkollektoren (auch Luftkollektoren) einsetzbar
- keine besonderen Anforderungen an den Standort

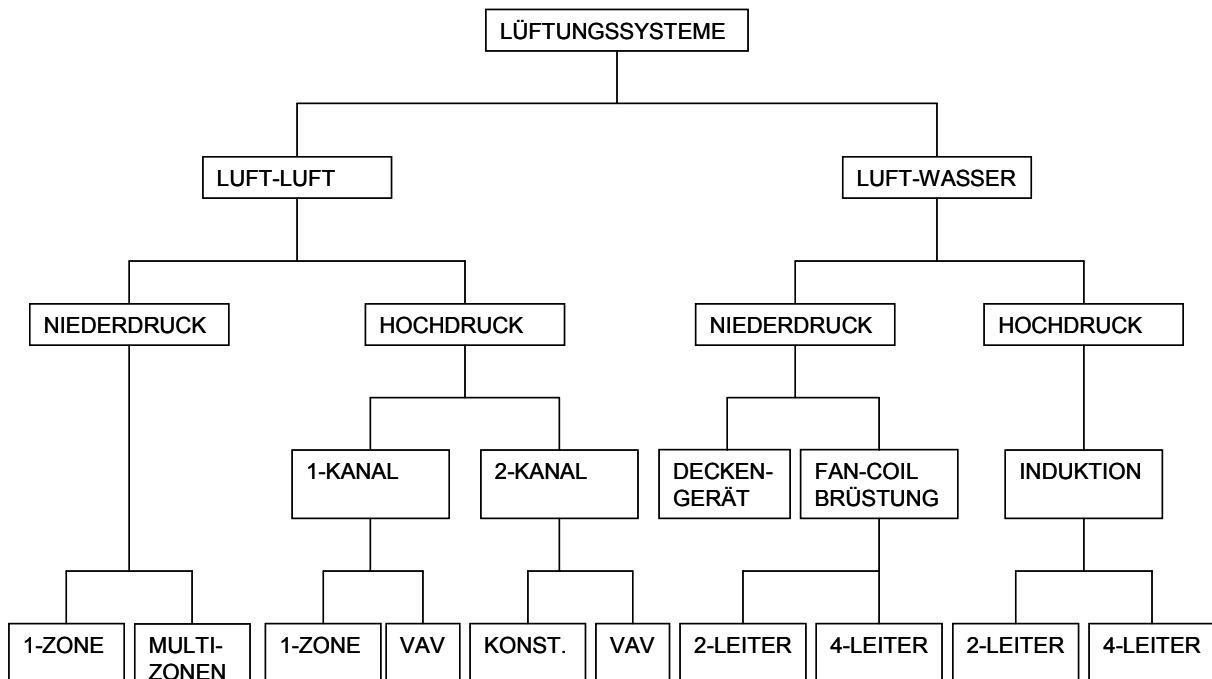
Nachteile:

- Gerätgrösse (Zu- und Abluft müssen zusammengeführt werden)

- geringe Verbreitung solcher Anlagen, da es bis heute nur wenige Hersteller dieser Systeme gibt
- bei hohen Außenluftfeuchten nicht realisierbar, da die Zuluft befeuchtet wird um durch Verdunstung zu kühlen. Ist jedoch die Zuluft schon annähernd wassergesättigt kann sie nur noch wenig zusätzliche Feuchte aufnehmen.
- nur für Lüftungskälte geeignet
- wenn Sorptionsräder eingesetzt werden, kann eine 100% Trennung der Zu- und Abluftströme nicht gewährleistet werden
- aufbereitetes Wasser ist notwendig.

5 Kriterien zur Weiternutzung bestehender Verteilsysteme

Bis in die 1990er Jahre wurde die thermische Behaglichkeit in Büro- und Dienstleistungsgebäuden ausschliesslich über Lüftungssysteme bzw. Klimaanlagen sichergestellt. Zur Gewährleistung der thermischen Behaglichkeit wurde, je nach Bedarf, die Zuluft entweder gekühlt oder vorgewärmt in den Raum eingebbracht. Die Lüftungssysteme bzw. Klimaanlagen können unterschieden werden in Luft-Luft-Systeme (LLS) und in Luft-Wasser-Systeme (LWS). Mit LLS werden sowohl die hygienische Frischluftzufuhr als auch die thermische Funktion von Kälte und Wärme gewährleistet. Bei LWS erfüllt das Lüftungssystem nur die Grundfunktion mit der Zufuhr von Außenluft [mit einem Luftwechsel der jedoch häufig höher war als der heute geforderte hygienische Mindestluftwechsel]. Die Erwärmung bzw. die Kühlung erfolgt durch ein getrenntes System. Bei diesem zweiten System ist das wärmetragende Medium nicht Luft, sondern Wasser [9]. Die damals eingesetzten Lüftungssysteme können nach der Unterscheidung in LLS und LWS noch weiter differenziert werden wie es in Figur 28 verdeutlicht wird.



Figur 28: Zusammenstellung der verschiedenen Lüftungssysteme

Bei Grossraumbüros erfolgte die Lufteinbringung in der Randzone des Gebäudes, wegen der erhöhten Kühllasten aufgrund des solaren Energieeintrags, über Hochdruckklimaanlagen. Die Luftkanäle der Hochdruckklimaanlage wurden oft senkrecht in der Außenwand bzw. den Stützen untergebracht. Die Innenzone wurde über Niederdruckanlagen mit gekühlter Zuluft versorgt. Die Klimaanlagen waren geschossweise zugeordnet und die Maschinenräume waren, bei Skelettbauten, im Gebäudekern untergebracht. Der Trend in den 1960er Jahren bestand darin, die Klimatisierung mittels Konvektion mit sehr hohem Luftwechsel zu realisieren. Dies führte oft zu relativ grosszügigen Dimensionen der Luft-

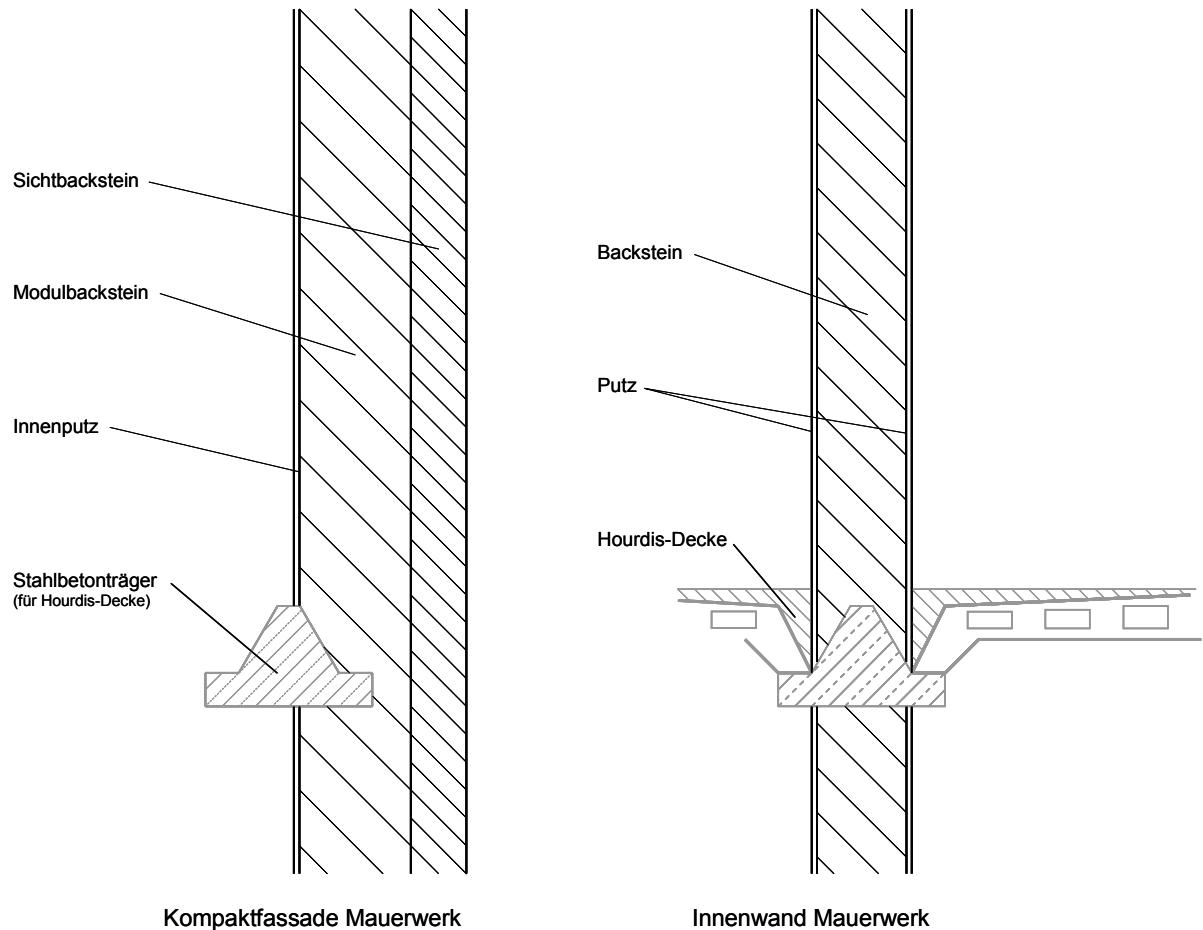
kanäle. Das Bestreben, die Querschnitte der Luftkanäle, aufgrund des wenigen zur Verfügung stehenden Platzes, so gering wie möglich zu halten, führte zu Zugerscheinungen [9], wegen hoher Zuluftgeschwindigkeiten, als Folge von möglichst kleinen Kanaldimensionen,. Wurde in dem zu sanierenden Gebäude ein LLS zur Gebäudekühlung eingesetzt, so ist es grundsätzlich möglich das bestehende Luftkanalnetz auch nach der Sanierung wieder zu verwenden, vorausgesetzt das Material weist eine genügend lange Restlebensdauer auf. Die Wiederverwendung der vorhandenen Luftkanäle bietet sich vor allem bei solchen Abgabesystemen an, die mit Zuluft kühlen, deren Wärmeträgermedium also Luft ist. Mögliche Abgabesysteme wären demnach Aktive Kühlpaneele bzw. Kühlbalken. Es muss zusätzlich untersucht werden, ob die Abmessungen des vorhandenen Verteilsystems die heutigen Anforderungen an die maximale Luftgeschwindigkeit bzw. den maximal zu fördernden Luftvolumenstrom erfüllen. Eine Wiederverwendung des Verteilsystems von LWS ist geeignet für die Kombination mit Abgabesystemen die ebenfalls mit Wasser als Wärmeträgermedium arbeiten. Solange die vorhandenen Rohre in einem guten Zustand sind und eine genügend hohe Restlebensdauer der Wasserrohre gewährleistet ist, kann eine Weiterverwendung des Verteilsystems in Betracht gezogen werden. Weitere Untersuchungen, wie z. B. die der richtigen Dimensionierung und Auslegung, sind unumgänglich.

6 Gebäudetypisierung

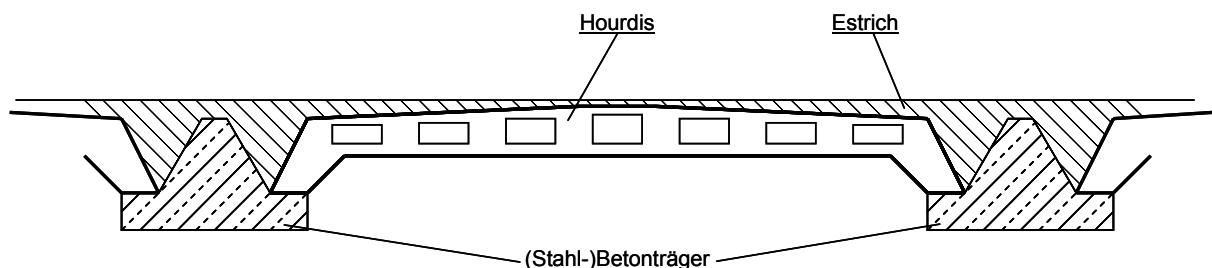
Es hat sich gezeigt, dass es zwei wesentliche Konstruktionsarten für Büro- und Verwaltungsgebäude im betrachteten Zeitraum gibt. Im Zeitraum von Anfang der 1950er Jahre bis in die 1960er Jahre wurden vorwiegend so genannte "Murale Bauten" verwirklicht. Ab Ende der 1950er/ Anfang der 1960er Jahre setzte sich im Bürohausbau immer mehr die Skelettbauweise durch. Der Grund dafür ist die Platz sparende Fassadenkonstruktion, die es ermöglichte den teuren Innenraum, der für die Nutzung als Büraum zur Verfügung stand, bei gegebenen Grundstücksgrenzen effektiver zu nutzen [12].

Die wesentlichen Unterschiede beider Konstruktionstypen bestehen sowohl bei der Fassade, als auch im Aufbau der Innenwände und der Deckenkonstruktion.

"Murale Bauten" haben geschlossene, massiv gemauerte einschalige Fassaden mit Fensteröffnungen. Der Fensterflächenanteil liegt im Durchschnitt bei 30 %. Oft wurde auch ein Vorsatz aus Kunststein-/ Natursteinplatten in den Mauerwerksverbund integriert. Das Mauerwerk, inkl. Vorsatz, musste allerdings einschalig ausgeführt sein, um den muralen Charakter des Gebäudes zu erhalten (vgl. Figur 29). Es war keine zusätzliche Dämmung nötig, da das Mauerwerk massiv und ausreichend stark ausgebildet war. Durch das Mauerwerk wurde somit eine genügend hohe Eigendämmung gewährleistet. Die Innenwände sind tragende Innenwände und wurden ebenfalls als massives Mauerwerk ausgebildet, wie in Figur 29 dargestellt ist. Die charakteristische Deckenkonstruktion bei "Muralen Bauten" sind Hourdis-Decken. Die Deckenträger bestehen bei dieser Konstruktionsart aus Stahl, Stahlbeton, Spannbeton oder Holz. Die Hourdis werden als lastabtragende Zwischenbauteile zwischen den Deckenträgern eingesetzt. Überwiegend wurden Beton-Hourdis-Decken konstruiert. Die Ansicht eines typischen Deckenaufbaus ist in Figur 30 dargestellt.



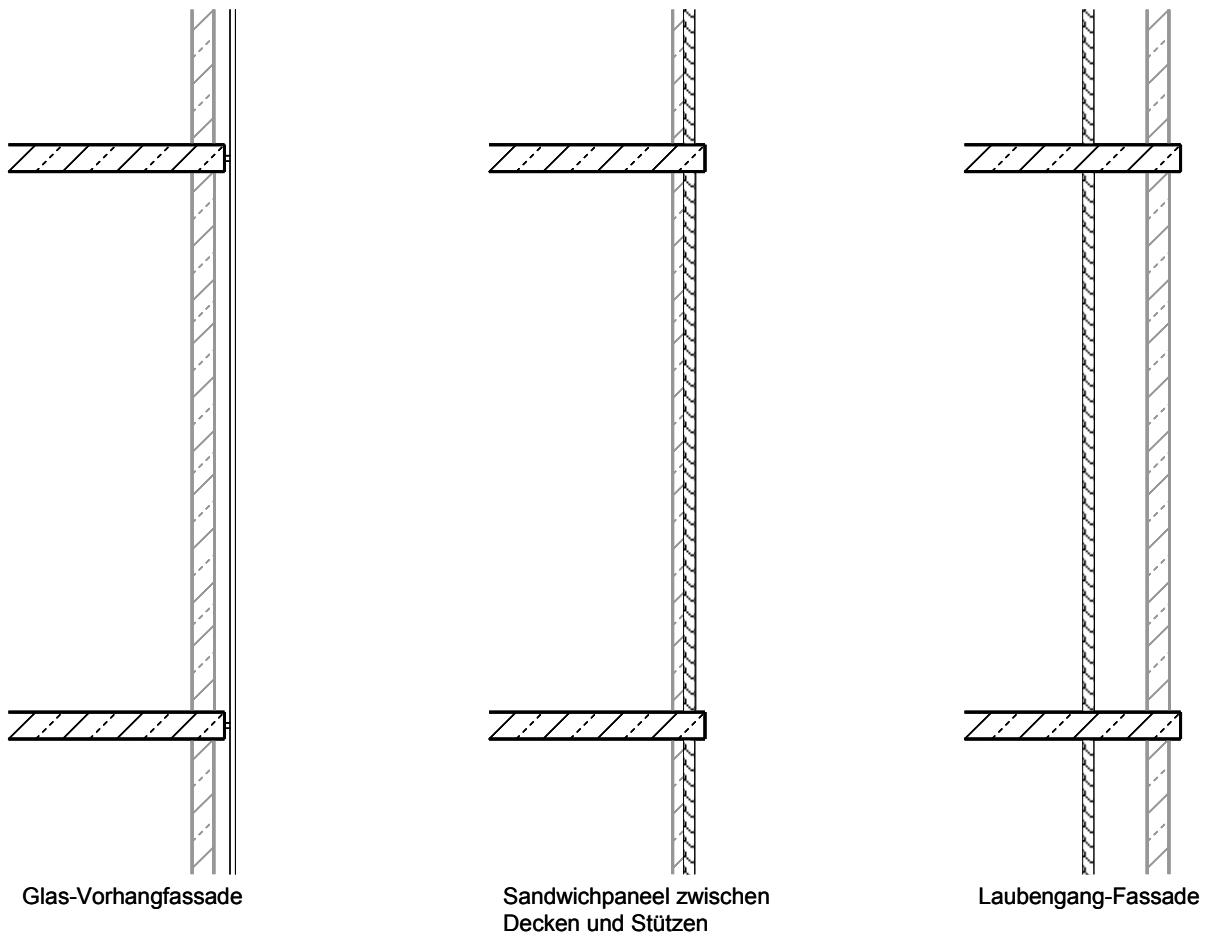
Figur 29: Typische Wandaufbauten von muralen Bauten



Figur 30: Schnitt durch eine Beton-Hourdis-Decke

Skelettbauten bestehen zum einen aus einem tragenden Gerüst, das in Europa überwiegend aus Stahlbeton gefertigt ist, und zum anderen aus einer Fassade, die den Raumabschluss darstellt. Die aussteifende Funktion übernehmen ein fester Kern aus Stahlbeton sowie die Stahlbetondecken. Der Stahlbetonkern dient zusätzlich der Unterbringung von Treppen, Aufzug, Kamin und der vertikalen Installationsschächte. Die horizontale Verteilung der Versorgungsleitungen erfolgt unter abgehängten Decken oder in einem Doppelboden. Die Fassadenkonstruktionen werden unterschieden in:

- Vorhangfassaden („Curtain Walls“)
- Fassadenelemente, die zwischen den Decken und Stützen eingebaut sind
- Zurückgesetzte Fassaden, bei so genannten „Laubenganghäusern“



Figur 31: Fassadenkonstruktionen

Das verwendete Fassadenmaterial ist sehr vielfältig, von Leichtmetall über Betonelemente zu Leichtbauelementen mit Rahmenkonstruktionen aus Holz. Überwiegend bestehen die Fassadenelemente jedoch aus Leichtmetall mit und ohne Wärmedämmung, aus Sandwichpaneelen oder die Fassade ist vollverglast ausgebildet (vergleiche dazu Figur 31). Der Fensterflächenanteil ist mit durchschnittlich 60 % bei Skelettbauten sehr hoch, wenn die Fassaden nicht sogar vollverglast sind (100 % Fensterfläche).

Für die folgenden Berechnungen kann zwischen siebzehn Gebäudegrundtypen, vor der Sanierung, unterschieden werden (vgl. Tabelle 17). Nach der Sanierung reduziert sich die Zahl der Gebäudegrundtypen auf fünf, da heutzutage unterschiedliche Bedingungen erfüllt werden müssen, um ein Gebäude (mechanisch) kühlen zu dürfen.

GEBÄUDETYPEN ALT:

- Typ 1.1: Skelettbau, Leichtmetallvorhangfassade ohne WD, Sonnenschutz innen/zwischen den Scheiben, zweifach-Glas normal, Massivdecken/Rippendecke
- Typ 1.2: Skelettbau, Leichtmetallvorhangfassade ohne WD, Sonnenschutz innen/zwischen den Scheiben, zweifach-Glas normal, abgehängte Decken (nur Grossraum)
- Typ 1.3: Skelettbau, Leichtmetallvorhangfassade ohne WD, Sonnenschutz innen/zwischen den Scheiben, zweifach-Glas normal, abgehängte Decken + Doppelboden (nur Grossraum)
- Typ 2.1: Skelettbau, Leichtmetallvorhangfassade mit WD, Sonnenschutz innen/zwischen den Scheiben, zweifach-Glas normal, Massivdecken/Rippendecke
- Typ 2.2: Skelettbau, Leichtmetallvorhangfassade mit WD, Sonnenschutz innen/zwischen den Scheiben, zweifach-Glas normal, abgehängte Decken (nur Grossraum)
- Typ 3.1: Skelettbau, Sandwichpaneel als Vorhangfassade, Sonnenschutz innen/zwischen den Scheiben, zweifach-Glas normal, Massivdecken/Rippendecken
- Typ 3.2: Skelettbau, Sandwichpaneel als Vorhangfassade, Sonnenschutz innen/zwischen den Scheiben, zweifach-Glas normal, abgehängte Decke (nur Grossraum)
- Typ 4.1: Skelettbau, vollverglaste Fassade, Sonnenschutz zwischen den Scheiben, zweifach-Glas normal, Massivdecken/Rippendecken
- Typ 4.2: Skelettbau, vollverglaste Fassade, Sonnenschutz zwischen den Scheiben, zweifach-Glas normal, abgehängte Decke (nur Grossraum)
- Typ 5.1: Skelettbau, Leichtmetallfassade ohne WD, Sonnenschutz aussen, zweifach-Glas normal, Massivdecken/Rippendecken
- Typ 5.2: Skelettbau, Leichtmetallfassade ohne WD, Sonnenschutz aussen, zweifach-Glas normal, abgehängte Decke (nur Grossraum)
- Typ 6.1: Skelettbau, Leichtmetallfassade mit WD, Sonnenschutz aussen, zweifach-Glas normal, Massivdecken/Rippendecken
- Typ 6.2: Skelettbau, Leichtmetallfassade mit WD, Sonnenschutz aussen, zweifach-Glas normal, abgehängte Decke (nur Grossraum)
- Typ 7.1: Skelettbau, Sandwichpaneel, Sonnenschutz aussen, zweifach-Glas normal, Massivdecken/Rippendecken
- Typ 7.2: Skelettbau, Sandwichpaneel, Sonnenschutz aussen, zweifach-Glas normal, abgehängte Decke (nur Grossraum)

MURALE BAUTEN:

- Typ 100.1: Kompaktfassade Mauerwerk, Innenwände aus Backstein verputzt, Hourdis-Decken

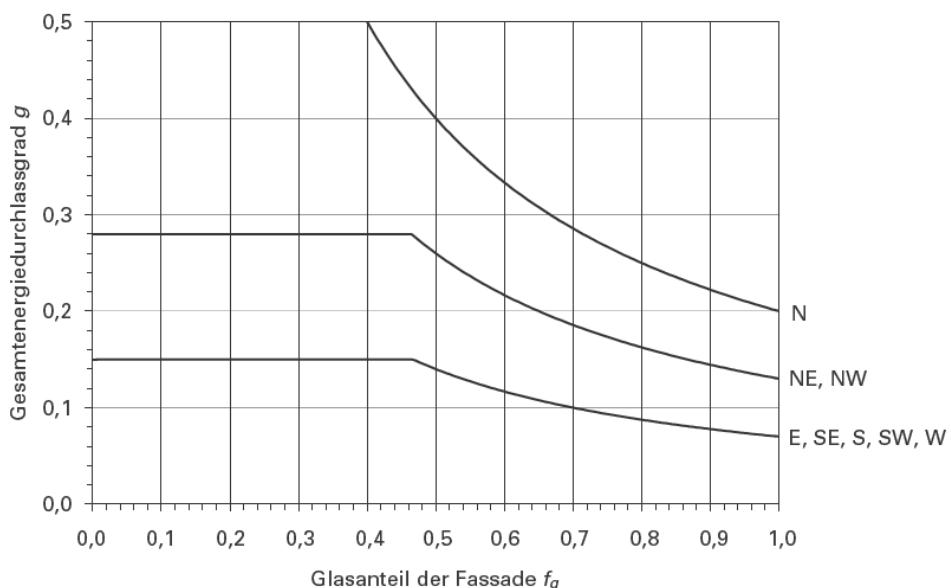
Tabelle 17 Typisierung der Bestandsgebäude vor der Sanierung

Diese Anforderungen an das zu kühlende Gebäude sind in der „SIA 382/1 Lüftungs- und Klimaanlagen - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen“ [3] geregelt. Aufgrund dieser Norm und ihrer Verankerung im Bundesgesetz durch die „Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich“ (MuKEN), ist es z. B. zwingend notwendig, einen aussenliegenden Sonnenschutz zu installieren, um die Anforderungen an den Gesamtenergiedurchlassgrad (g_{total} -Wert) von Fenstern inklusive Sonnenschutz erfüllen zu können. Mit einem innenliegenden bzw. zwischen den Scheiben des Fensters installierten Sonnenschutz in Kombination mit einem heutigen "Standardfenster" (Zweifach-Wärmeschutzglas) wird der in der SIA 382/1 geforderte Grenzwert überschritten. In der SIA 382/1 heißt es zum Sonnenschutz: "2.1.3.1 Bei Räumen, für welche nach den Kriterien dieser Norm eine Kühlung notwendig oder erwünscht ist, und bei allen Räumen, welche tatsächlich gekühlt werden, müssen die nachfolgenden Anforderungen an den Sonnenschutz eingehalten werden. Auch bei Räumen ohne Kühlbedarf ist deren Einhaltung anzustreben."

2.1.3.2 Fassadenfenster müssen je nach Orientierung und Glasanteil fg des Raumes zusammen mit dem Sonnenschutz die folgenden Anforderungen an den Gesamtenergiedurchlassgrad g erfüllen (siehe Figur 2):

- N-Fassade $g \leq \text{MIN} (0.20/fg; 1.00)$
- NE- und NW-Fassade $g \leq \text{MIN} (0.13/fg; 0.28)$
- E-, SE-, S-, SW- und W-Fassade $g \leq \text{MIN} (0.07/fg; 0.15)$

Zwischenorientierungen können linear interpoliert werden. Wenn bei N-, NE- oder NW-Fassaden mit Reflexionen von Nachbarfassaden zu rechnen ist, sind die Anforderungen für E- bis W-Fassaden anzuwenden." [3]



Figur 32: Anforderungen an den g -Wert von Fassadenfenstern (Verglasung und Sonnenschutz) je nach Glasanteil und Orientierung [3]

Diese Grenzwerte können bei einem Fensterflächenanteil von mindestens 60 % bei Skelettbauten nur durch einen aussenliegenden Sonnenschutz eingehalten werden. Mit einem Fensterflächenanteil von 60 % (100 %) und einem Rahmenanteil des Fensters von 20 % ergibt sich der Glasanteil der Fassade zu $fg = 0.48$ ($fg = 0.8$). Mit den Angaben nach SIA 382/1 (vgl. oben) errechnet sich der geforderte Gesamtenergiedurchlassgrad der entscheidenden Fassaden zu $g_{total} = 0.1458$ ($g_{total} = 0.0875$). Bei einem gewählten Zweifach-Wärmeschutzglas mit einem Gesamtenergiedurchlassgrad von $g_{Fenster} = 0.57$ (siehe Tabelle 18) sollte der Sonnenschutz einen Energiedurchlassgrad von maximal $g_{Sonnenschutz} = 0.2558$ ($g_{Sonnenschutz} = 0.1535$) aufweisen. Dieser Wert bzw. der geforderte Gesamtenergiedurchlassgrad von Fenster inklusive Sonnenschutz von $g_{total} = 0.1458$ ($g_{total} = 0.0875$) kann mit steuerbarem aussenliegendem hellen Sonnenschutz eingehalten werden (vgl. dazu Tabelle 19). Bei Muralen Bauten mit einem Fensterflächenanteil von 30 % und einem Fenster mit 20 % Rahmen errechnet sich ein Glasanteil von $fg = 0.24$. Daraus ergibt sich ein geforderter Gesamtenergiedurchlassgrad, der nicht höher liegen darf als $g_{total} = 0.15$ bei den massgebenden Fassadenorientierungen. Der gewählte Son-

nenschutz sollte aufgrund dessen einen Energiedurchlassgrad von maximal $g_{\text{Sonnenschutz}} = 0.263$ haben. Unter diesen Bedingungen empfiehlt sich ebenfalls die Verwendung eines aussenliegenden Sonnenschutzes, um die Anforderung an den Gesamtenergiedurchlassgrad von Fenster und Sonnenschutz erfüllen zu können (vgl. dazu Tabelle 19).

| Verglasung | U_g in W/m ² ·K | τ_v | ρ_v | τ_e | q_i | g |
|---|------------------------------|----------|----------|----------|-------|------|
| Einfachglas normal | > 5 | 0,89 | 0,08 | 0,83 | 0,02 | 0,85 |
| Einfach-Wärmeschutzglas (hartbeschichtet) | 3,7 | 0,82 | 0,11 | 0,68 | 0,06 | 0,74 |
| Zweifachglas normal | 2,9 | 0,82 | 0,15 | 0,73 | 0,04 | 0,77 |
| Zweifach-Wärmeschutzglas | 1,3 | 0,76 | 0,12 | 0,53 | 0,11 | 0,64 |
| Zweifach-Wärmeschutzglas | 1,0 | 0,75 | 0,13 | 0,45 | 0,12 | 0,57 |
| Zweifach-Kombiglas 73/41 | 1,2 | 0,73 | 0,12 | 0,41 | 0,03 | 0,44 |
| Zweifach-Kombiglas 50/24 | 1,1 | 0,50 | 0,12 | 0,24 | 0,03 | 0,27 |
| Dreifachglas normal | 2,0 | 0,75 | 0,20 | 0,63 | 0,06 | 0,69 |
| Dreifach-Wärmeschutzglas | 0,7 | 0,71 | 0,14 | 0,42 | 0,09 | 0,51 |
| Dreifach-Wärmeschutzglas | 0,5 | 0,66 | 0,14 | 0,36 | 0,11 | 0,47 |

U_g Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung
 τ_v Lichttransmissionsgrad
 ρ_v Lichtreflexionsgrad

τ_e direkter solarer Transmissionsgrad
 q_i sekundärer Wärmeabgabegrad
 g Gesamtenergiedurchlassgrad

Tabelle 18 Solare und thermische Kennwerte typischer Verglasungen [3]

| Verglasung | Sonnenschutz | Farbe | $\tau_{e,B}$ | τ_v | g |
|--------------------------|--------------|---------|--------------|----------|------|
| Zweifachglas normal | aussen | pastell | 0,1 | 0,09 | 0,13 |
| Zweifachglas normal | innen | hell | 0,1 | 0,09 | 0,37 |
| Zweifach-Wärmeschutzglas | aussen | pastell | 0,1 | 0,08 | 0,09 |
| Zweifach-Wärmeschutzglas | innen | hell | 0,2 | 0,16 | 0,40 |
| Zweifach-Kombiglas 73/41 | innen | hell | 0,2 | 0,15 | 0,32 |
| Zweifach-Kombiglas 50/24 | innen | hell | 0,2 | 0,11 | 0,23 |
| Dreifachglas normal | aussen | pastell | 0,1 | 0,08 | 0,11 |
| Dreifachglas normal | innen | hell | 0,1 | 0,09 | 0,37 |
| Dreifach-Wärmeschutzglas | aussen | pastell | 0,1 | 0,07 | 0,07 |
| Dreifach-Wärmeschutzglas | innen | pastell | 0,2 | 0,15 | 0,40 |
| Dreifach-Wärmeschutzglas | innen | hell | 0,2 | 0,15 | 0,36 |

$\tau_{e,B}$ solarer Transmissionsgrad des Sonnenschutzes

Tabelle 19 Solare Kennwerte typischer Verglasungen mit Sonnenschutz [3]

Aufgrund der genannten Anforderung an den Gesamtenergiedurchlassgrad der Fenster plus Sonnenschutz finden die Gebäudetypen mit innen liegendem oder zwischen den Scheiben angebrachtem Sonnenschutz in der Betrachtung der sanierten Gebäude keine Berücksichtigung.

Ein weiteres Reduktionskriterium, das aus der SIA 382/1 hervorgeht, ist die Anforderung an den U-Wert der einzelnen Bauteile. Dort heisst es:

"2.1.1.1 Die Grenzwerte für die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle und die Anforderungen an den Wärmeschutz im Winter und Sommer nach Norm SIA 180 sowie die Grenzwerte für die Anforderungen an das Gebäude nach Norm SIA 380/1 müssen in jedem Fall eingehalten werden." [3]

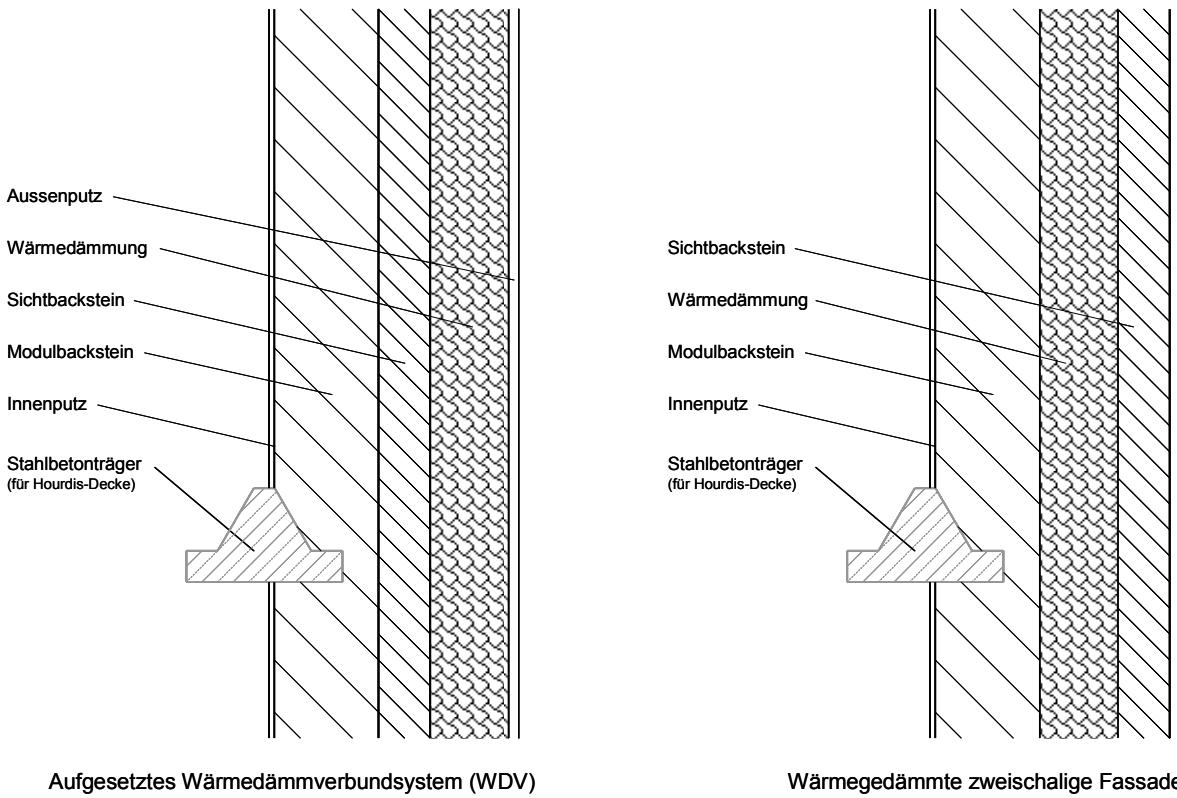
| | Grenzwerte U_{li} W/(m ² .K) | | Zielwerte U_{ta} W/(m ² .K) | |
|--|---|---|---|---|
| Bauteil gegen Bauteil | Aussenklima oder weniger als 2 m im Erdreich | unbeheizte Räume oder mehr als 2 m im Erdreich | Aussenklima oder weniger als 2 m im Erdreich | unbeheizte Räume oder mehr als 2 m im Erdreich |
| opake Bauteile (Dach, Decke, Wand, Boden) | 0,25 | 0,35 | 0,15 | 0,25 |
| opake Bauteile mit Flächenheizungen | 0,25 | 0,30 | 0,15 | 0,20 |
| Fenster ¹ , Fenstertüren und Türen | 1,5 | 1,7 | 1,0 | 1,2 |
| Fenster mit vorgelagerten Heizkörpern | 1,2 | 1,5 | 0,9 | 1,1 |
| Tore (Türen grösser als 6 m ²) | 1,7 | 2,0 | 1,4 | 1,7 |
| Storenkasten | 0,60 | 0,60 | 0,40 | 0,40 |

Tabelle 20 Einzelbauteilnachweis: Grenz- und Zielwerte für flächenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten bei 20°C Raumtemperatur und bei Jahresmitteltemperaturen zwischen 7°C und 10°C [5]

In der Norm „SIA 380/1 Thermische Energie im Hochbau“ [5] sind die Grenzwerte der flächenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) angegeben, die bei einer Sanierung angestrebt werden sollen. Aufgrund der Vorgabe, bei opaken Bauteilen einen U-Wert von 0,25 W/(m²*K) (vgl. Tabelle 20) anzustreben, und dem Trend bei Fassadensanierungen vorzugsweise Sandwichpaneelle einzusetzen, ergibt sich bei den Grundtypen der Skelettbauten eine Reduktion auf zwei Fassadenkonstruktionen:

- Sandwichpaneel mit 60 % Fenstern
- vollverglaste Fassade.

Bei den Muralen Bauten wird eine nachträgliche Wärmedämmung der vorher ungedämmten Kompaktfassade aus Mauerwerk nötig. Mit einer zusätzlichen Schicht Wärmedämmung verliert das Gebäude seinen muralen Charakter, da die Außenwand dann als zweischalig gilt. Die Massnahme ist jedoch notwendig, um den Grenzwert des Wärmedurchgangskoeffizienten von $U=0,25$ W/(m²*K), der im Einzelbauteilnachweises nach SIA 380/1 gefordert ist, einhalten zu können. Der Schnitt durch mögliche Konstruktionen von nachträglich wärmegedämmten Außenwänden muraler Gebäude ist in folgender Abbildung dargestellt.



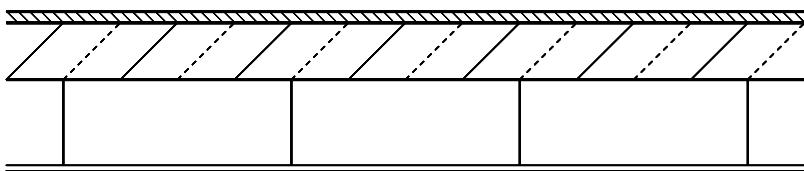
Figur 33: Nachträglich wärmegedämmte Außenwände Muraler Bauten

Nach der Differenzierung zwischen Muralen Bauten und Skelettbauten und der weitergehenden Unterscheidung der Fassadenkonstruktion bei den Skelettbauten werden für eine detaillierte Typisierung anschliessend noch die Deckenkonstruktionen betrachtet. Bei den Muralen Bauten kann keine weiterführende Typisierung durchgeführt werden, da die überwiegende Deckenkonstruktion bei dieser Gebäudeart die Hourdis-Decken sind. Zwar gibt es auch bei Hourdis-Decken verschiedene Typen aufgrund der unterschiedlichen verwendeten Materialien (siehe weiter vorne), allerdings ist eine Typisierung aufgrund unterschiedlicher Materialien für diese Zwecke nicht relevant. Bei den Skelettbauten allerdings können drei Hauptdeckenkonstruktionen unterschieden werden:

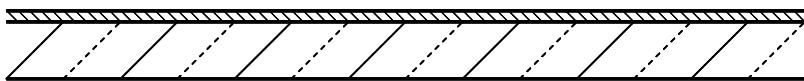
- abgehängte Decke
- Massivbetondecke mit freier, ebener Deckenfläche
- profilierte Betondecke (z. B. Rippendecke, Kassettendecke u. a.).

Die Unterscheidung der Deckenkonstruktion in diese drei Konstruktionstypen ist wichtig, da sie unterschiedliche Eigenschaften bezüglich der Wärmespeicherfähigkeit zum einen und der Installationsmöglichkeit der verschiedenen Abgabesysteme zum anderen aufweisen. In einem Raum mit abgehängter Decke z. B. liefert die Betondecke keinen Beitrag zur Wärmespeicherfähigkeit des Raumes. Durch die abgehängte Decke wird die Betondecke thermisch vom Raum entkoppelt. Räume mit einer freien Massivbetondecke liefern den grössten Beitrag an Wärmespeicherfähigkeit im Raum, da die Decke eine ausreichende Masse aufweist, die die Wärme direkt speichern kann. Profilierte Betondecken dagegen sind zwar frei zugänglich um die Wärme zu speichern, jedoch ist ihre speicherwirksame Masse geringer als bei Massivdecken. Unabhängig von der fehlenden Wärmespeicherfähigkeit des Raumes wird die Massenreduktion des Betons bei profilierten Decken erwünscht. Durch die geringe Masse wird das Eigengewicht der Decke reduziert und dadurch können grössere Deckenspannweiten realisiert werden, was gleichbedeutend ist mit einer grösseren realisierbaren freien Nutzfläche ohne störende Stützen oder tragende Wände. Für die Berechnung mit dem SIA-Berechnungstool werden im Folgenden die beiden Konstruktionstypen Massivdecke und profilierte Decke zusammengefasst. Das Berechnungstool unterscheidet bei der Kühllastberechnung nicht zwischen ebener und profilierte Deckenfläche. Die Wärmespeicherfähigkeit wird allein über die Deckenmasse berücksichtigt.

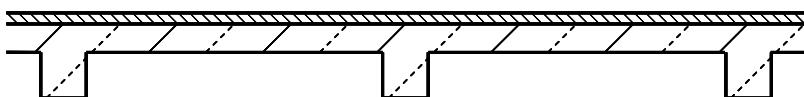
Die drei verschiedenen Deckenkonstruktionen sind in der folgenden Abbildung dargestellt:



Abgehängte Decke



Massivdecke



Rippendecke

Figur 34: Deckenkonstruktionen

Aus den vorgehenden Überlegungen ergeben sich demnach bei den Gebäuden nach der Sanierung fünf Grundtypen für die Kühlleistungsberechnung (vgl.Tabelle 21). Für jeden dieser Grundtypen wird im Folgenden der Kühlleistungsbedarf für einen definierten Referenzraum mit mittlerer Belegung und mittleren internen Kühllasten berechnet. Des Weiteren findet die Typisierung der sanierten Gebäude in die Gebäudegrundtypen, die in Tabelle 21 definiert sind, mit der zusätzlichen Unterscheidung zwischen ebener und profiliertter Deckenfläche, vor allem bei der Untersuchung der baulichen Integrierbarkeit der Abgabesysteme Berücksichtigung.

GEBÄUDETYPEN SANIERT:

- Typ 11.1: Skelettbau, Sandwichpaneele als Vorhangsfassade, Sonnenschutz aussen, zweifach Wärmeschutzverglasung, Massivdecken/Rippendecken
- Typ 11.2: Skelettbau, Sandwichpaneele als Vorhangsfassade, Sonnenschutz aussen, zweifach Wärmeschutzverglasung, abgehängte Decken
- Typ 12.1: Skelettbau, vollverglaste Fassade, Sonnenschutz aussen, zweifach Wärmeschutzverglasung, Massivdecken/Rippendecken
- Typ 12.2: Skelettbau, vollverglaste Fassade, Sonnenschutz aussen, zweifach Wärmeschutzverglasung, abgehängte Decken

MURALE BAUTEN:

- Typ 110.2 Kompaktfassade Mauerwerk mit Wärmedämmverbundsystem (WDV), Innenwände aus Backstein verputzt, Hourdis-Decken

Tabelle 21 Typisierung der Bestandsgebäude nach der Sanierung

6.1 KÜHLLEISTUNGSBEDARF DER JEWELIGEN GEBÄUDETYPEN

Jeder Gebäudetyp hat eine abzuführende spezifische Grundkühllast, deren Höhe durch die vorhandene aktive Speichermasse, den Fensterflächenanteil und die Fassadenkonstruktion bestimmt wird. Diese Grundkühllast setzt sich zusammen aus den internen Kühllasten und den solaren/ externen Kühllasten. Die internen Lasten werden durch eine mittlere thermische Belastung durch Personen, Beleuchtung und elektrische Geräte verursacht. Die solaren Kühllasten errechnen sich aus der mittleren Tagessumme der Globalstrahlung (G) [8] und dem Gesamtenergiedurchlassgrad der Fenster inklusive Sonnenschutz. Um die Ergebnisse der Berechnungen vergleichbar zu machen wurde ein Referenzraum definiert, siehe Anhang 1.

Im Folgenden bildet dieser Referenzraum mit einer mittleren Belegung und mittleren thermischen Lasten die Basis der Berechnungen. Die Variablen in der Berechnung sind:

- die verschiedenen Fassadenkonstruktionen mit dem entsprechenden Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)
- der Sonnenschutz mit seiner Lage und dem resultierenden g_{total}
- der Fensterflächenanteil
- die Deckenkonstruktion, die vor allem bei den Skelettbauten massgebend für die Höhe der aktiven Speichermasse des Gebäudes ist.

Die Berechnung der internen Kühllasten und somit auch des Kühlleistungsbedarfs der verschiedenen Gebäudetypen wurde mit einem SIA-Berechnungstool durchgeführt. Das Tool basiert auf der Kühllastberechnung nach SIA 382/1 sowie „SIA V 382/2 Kühlleistungsbedarf von Gebäuden“. Der Energie- und Elektrizitätsbedarf kann ebenfalls durch das Tool ermittelt werden, die Berechnung basiert auf „SIA 380/4 Energie im Hochbau“. Auf den Elektrizitätsbedarf des Gebäudes und auf dessen Berechnung wird im Rahmen der Studie nicht eingegangen. Für die Untersuchung der baulichen Integrierbarkeit der Kühsysteme wurde für jeden Gebäudetyp, sowohl vor als auch nach einer Sanierung (Eckdaten nach Tabelle 22), die Kühllastberechnung mit dem SIA-Tool durchgeführt.

| | Vorher | Nachher |
|--|---|---|
| U-Wert Fenster [W/(m ² *K)] | 3,05 | 1,46 |
| g-Wert Fenster inkl. Sonnenschutz[-] | 0,83 (Sonnenschutz innen bzw. zwischen den Scheiben) 0,40 (Sonnenschutz aussen) | 0,1458 (Skelettbau 60% Fensterfläche) 0,0875 (Skelettbau 100% Fensterfläche) 0,1500 (Muraler Bau) |
| U-Wert Aussenwand [W/(m ² *K)] | 5,88 (Skelettbau, Alu-Fassade ungedämmt) 4,33 (Skelettbau, Alu-Fassade wärmegedämmt) 0,87 (Muraler Bau) | 0,15 (Skelettbau, Sandwichpaneel) 0,13 (Muraler Bau, WDV) |

Tabelle 22 Gegenüberstellung von U-Wert und g-Wert vor und nach der Sanierung

Beispielhaft werden hier einige Teilergebnisse dargestellt, um z. B. den Einfluss einer Gebäudesanierung auf den Kühlenergiebedarf darzustellen. Zusätzlich wird der Einfluss der Deckenkonstruktion auf die Wärmespeicherfähigkeit der Räume deutlich und es wird klar, dass bei der Kombination abgehängte Decke mit Doppelboden bei Skelettbauten die geforderte aktive Speichermasse selten realisiert werden kann (vgl. dazu Figur 35). Auch wenn bei einem Raum mit den Abmessungen des definierten Referenzraumes die Anforderung an die Wärmespeicherkapazität erfüllt ist, ist nicht gesagt, dass die Anforderung immer erfüllt wird. Bei einem Raum mit grösserer Grundfläche ist die geforderte Wärmespeicherkapazität schon nicht mehr vorhanden.

Übersicht Raumdaten

| | erfüllt | nicht erfüllt/nicht berechnet | | |
|---|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------|
| | Fläche A(NGF) m ² | Räume Stk. | Fläche A(NGF) m ² | Räume Stk. |
| Sonnenschutz nach SIA 382/1 | 26 | 1 | 0 | 0 |
| Wärmekapazität nach SIA 382/1 | 26 | 1 | 0 | 0 |
| Aussenluftvolumenstrom nach SIA 382/1 | 26 | 1 | 0 | 0 |
| Standard-Geräteleistung nach SIA 2024 | 26 | 1 | 0 | 0 |
| Standard-Beleuchtungsleistung nach SIA 2024 | 26 | 1 | 0 | 0 |

| el. Leistungsbedarf Lüftung/Klima | Wärme- kap. | Sonnenschutz PW | Sonnen- schutz GW |
|--------------------------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|
| W/m ² | Wh/(m ² K) | - | - |
| 5.1 | 45 | 0.15 | 0.15 |

Übersicht Raumdaten

| | erfüllt | nicht erfüllt/nicht berechnet | | |
|---|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------|
| | Fläche A(NGF) m ² | Räume Stk. | Fläche A(NGF) m ² | Räume Stk. |
| Sonnenschutz nach SIA 382/1 | 59 | 1 | 0 | 0 |
| Wärmekapazität nach SIA 382/1 | 0 | 0 | 59 | 1 |
| Aussenluftvolumenstrom nach SIA 382/1 | 59 | 1 | 0 | 0 |
| Standard-Geräteleistung nach SIA 2024 | 59 | 1 | 0 | 0 |
| Standard-Beleuchtungsleistung nach SIA 2024 | 59 | 1 | 0 | 0 |

| el. Leistungsbedarf Lüftung/Klima | Wärme- kap. | Sonnenschutz PW | Sonnen- schutz GW |
|--------------------------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|
| W/m ² | Wh/(m ² K) | - | - |
| 5.0 | 28 | 0.15 | 0.15 |

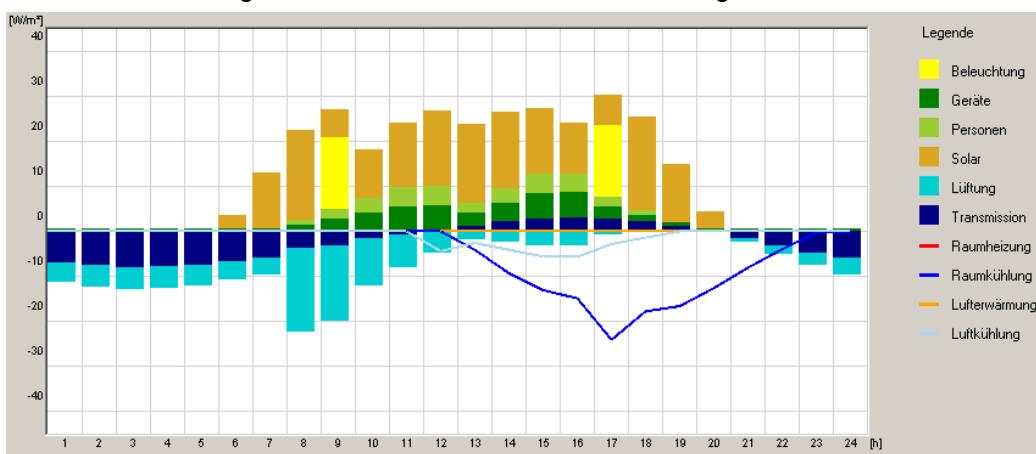
Figur 35: Wärmespeicherfähigkeit bei Skelettbauten mit abgehängter Decke und Doppelboden

Der Einfluss einer Gebäudesanierung und die Einhaltung der geforderten Grenzwerte nach der Sanierung zeigen eine deutliche Reduktion des Kühlleistungsbedarfs im Sommer. Wie in Figur 36 zu sehen ist, vermindert sich nach der Sanierung die solare Kühllast eines Skelettbau mit vollverglaste Fassade drastisch, jedoch ergibt sich vormittags und nachmittags eine zusätzliche Kühllast durch Beleuchtung. Vor der Sanierung gab es keine durch Beleuchtung bedingte Kühllast. Eine Beleuchtung vormittags und nachmittags wird bei den sanierten Skelettbauten nötig, da durch den aussenliegenden Sonnenschutz nicht nur der Eintrag solarer Energie verhindert wird, sondern gleichzeitig verringert sich die natürliche Belichtung des Raumes. Vormittags und nachmittags hat die Sonne einen relativ spitzen Einfallswinkel (zur Horizontalen), dadurch besteht eine grössere Gefahr der Blendung als zu Zeiten mit einem grossen Sonneneinfallswinkel wie es um die Mittagszeit der Fall ist. Um eine Blendung zu vermeiden wird der Sonnenschutz fast vollständig geschlossen. Dies wiederum macht eine künstliche Beleuchtung notwendig. Ebenfalls ist eine deutliche Verringerung der Kühllasten infolge Transmission zu erkennen. Diese doch recht deutlichen Verringerungen der externen Kühllasten ergeben einen stark reduzierten Kühlleistungsbedarf im sanierten Fall gegenüber dem Ursprungsbau (vor der Sanierung mit Sonnenschutz zwischen den Scheiben der Fenster / nach der Sanierung mit erneuerten Fenstern und aussenliegendem Sonnenschutz).

vor der Sanierung mit Sonnenschutz zwischen den Scheiben der Fenster



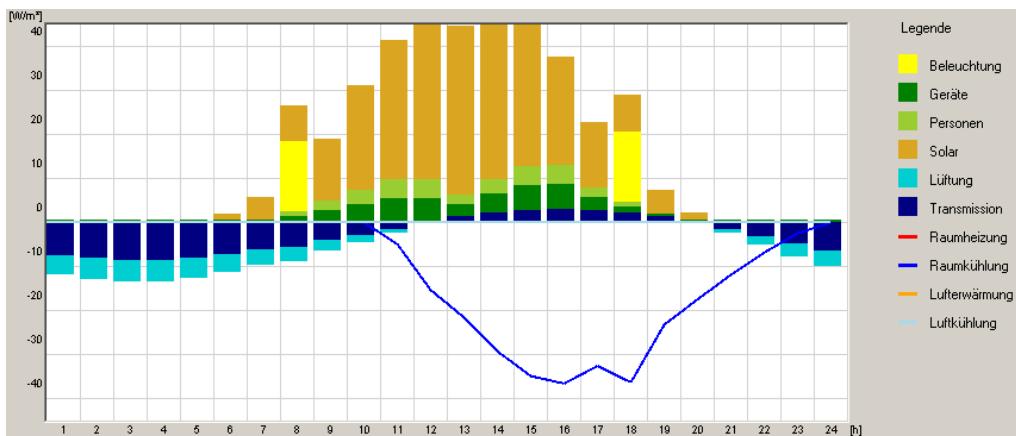
nach der Sanierung mit erneuerten Fenstern und aussenliegendem Sonnenschutz



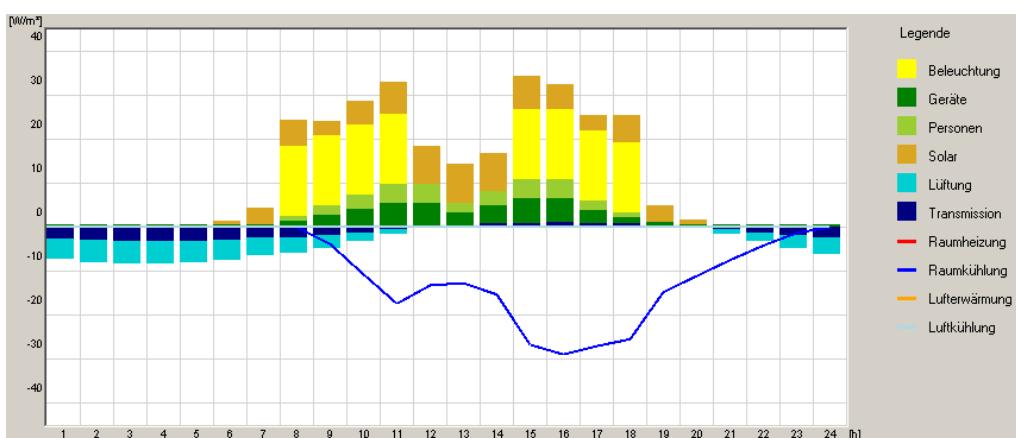
Figur 36: Spezifische Leistung eines Skelettbau, vollverglaste Fassade (Sommertag)

Bei den Muralen Bauten ist die Reduktion des Kühlleistungsbedarfs, wie auch bei den Skelettbauten, ebenfalls sehr markant (siehe Figur 37). Murale Bauten haben zwar einen niedrigeren Fensterflächenanteil (Murelle Bauten 30 %, Skelettbauten 60 % / 100 %), aber da der Grossteil der abzuführenden Kühllasten auch hier durch den solaren Energieeintrag durch die Fenster zustande kommt, ist nach Austausch der Fenster und der Verbesserung des Sonnenschutzes eine deutliche Reduktion der Kühlenergie zu erkennen. Genauso wie bei den Skelettbauten erhöht sich bei den Muralen Bauten nach der Sanierung die spezifische Leistung der Beleuchtung. Auch hier ist dieses Phänomen mit der Nutzung des Sonnenschutzes zu begründen. (Vor der Sanierung mit Sonnenschutz zwischen den Scheiben der Fenster / nach der Sanierung mit erneuerten Fenstern und aussen liegendem Sonnen-schutz.)

Vor der Sanierung mit Sonnenschutz zwischen den Scheiben der Fenster



nach der Sanierung mit erneuerten Fenstern und aussenliegendem Sonnenschutz



Figur 37: Spezifische Leistung eines Muralen Gebäudes (Sommertag)

Sowohl bei den sanierten Skelettbauten als auch bei den sanierten Muralen Bauten verringern sich die Lüftungsverluste. Dieser Umstand ist mit der dichteren Gebäudehülle nach der Sanierung zu begründen. Zwar verringern sich durch die dichteren Gebäude die Lüftungsverluste, jedoch steigt dadurch auch der Energiebedarf für eine Lüftung. Das liegt daran, dass sich der latente Luftwechsel über Fugenlüftung und Undichtigkeiten in der Gebäudehülle etc. verringert. Um dennoch einen hygienischen Mindestluftwechsel gewährleisten zu können, steigt der Anteil an mechanischer Lüftung.

7 Messungen Basler & Hofmann Rehalp

Um fundierte Aussagen über ein energieeffizientes Gesamtsystem für Sanierungen zu erhalten, wurden bei Basler und Hofmann, Standort Rehalp, Zürich, Messungen durchgeführt. Das Gebäude wurde 2004 saniert und aufgestockt. Vor der Sanierung war keine Kühlung vorhanden.

7.1 FUNKTIONSWEISE ABGABESYSTEM

Das Abgabesystem ist ein Brüstungsgerät¹ welches nach dem Konvektionsprinzip arbeitet. Im Gerät ist zudem der Zuluftdurchlass integriert. Im Gerät wird mit einem energieeffizienten DC-Ventilator eine schnelle Reaktion über Konvektion erreicht. Mit ca. 4 W pro Gerät besitzt der eingesetzte Ventilator eine sehr geringe Ventilatorantriebsleistung. Pro Raummodul sind im Normalfall 2 Brüstungsgeräte (2 Ventilatoren) eingebaut. Das Brüstungsgerät kann sowohl für Kühl als auch für Heizzwecke genutzt werden. Die hydraulische Anbindung erfolgt im 2-Leiter-Prinzip. Die Arbeitstemperaturen auf der Wassersseite liegen im Bereich von 18°C bis 20°C im Kühlfall und ca. 27°C im Heizfall. Die Geräte erlauben eine individuelle Regulierung der Raumtemperatur. Für die Nachtauskühlung wird die aktivierbare Speichermasse der Räume genutzt.

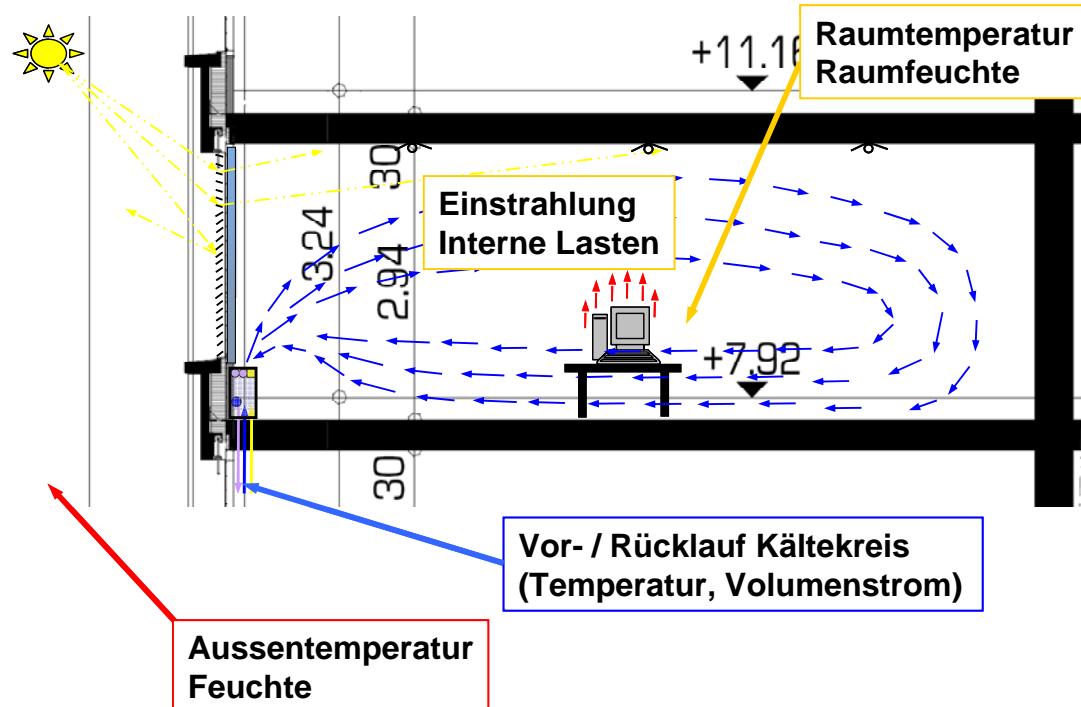
¹ Typ "RioTherm", Hersteller: Erich Keller AG, Sulgen

7.2 FUNKTIONSWEISE ERZEUGERSYSTEM

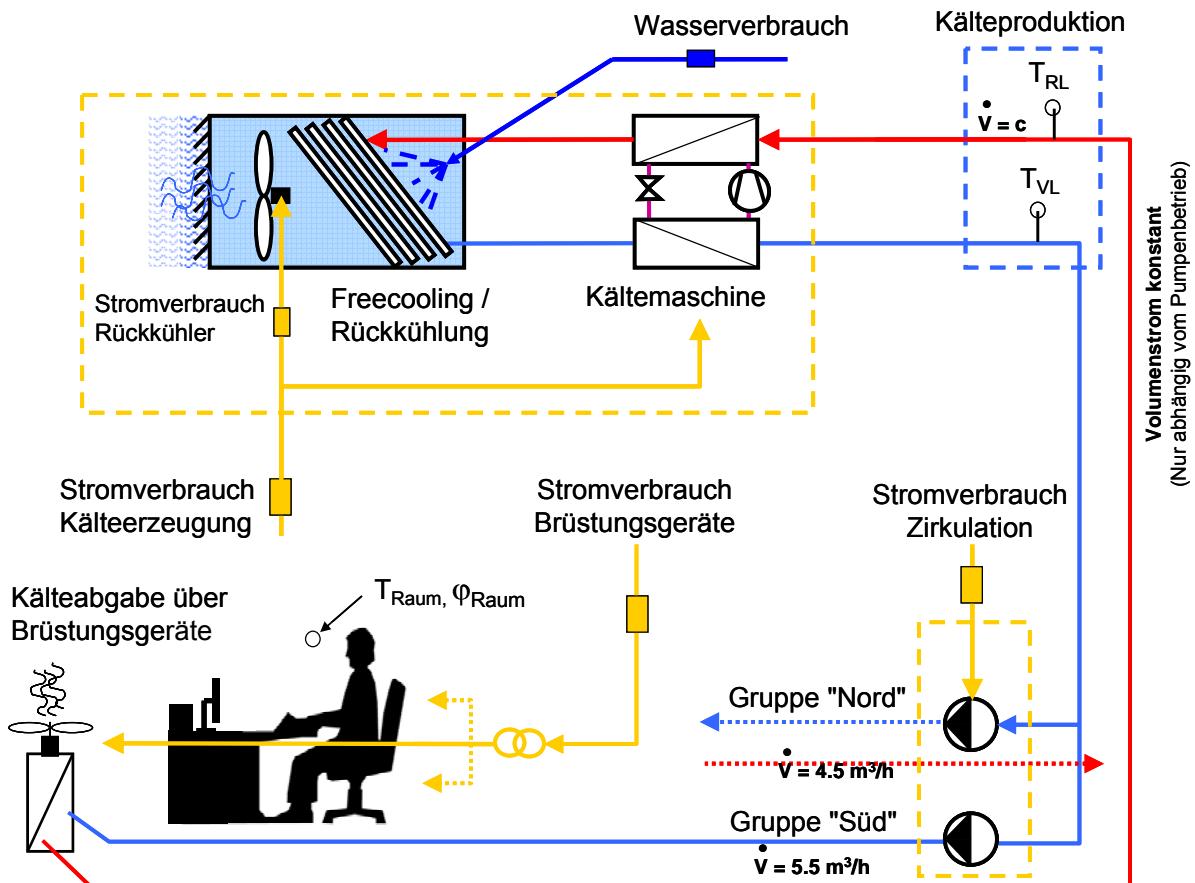
Die Kälteerzeugung besteht aus einem neuartigen Verdunstungskühler der für Spitzenleistungen von einer Kältemaschine unterstützt wird. Die Energieerzeugung besteht aus einem adiabaten Rückkühler und einer reversiblen Propanwärmepumpe. Der Rückkühler funktioniert ohne Wasseraufbereitung.

7.3 DURCHGEFÜHRTE MESSUNGEN

Gemessen wurde einerseits der erbrachte Komfort; Raumtemperatur und Raumluftfeuchtigkeit, gemäss Figur 38, anderseits der Energieverbrauch und die Effizienz der Anlage, gemäss Figur 39. Sechs Büroräume in unterschiedlich exponierten Lagen wurden untersucht.

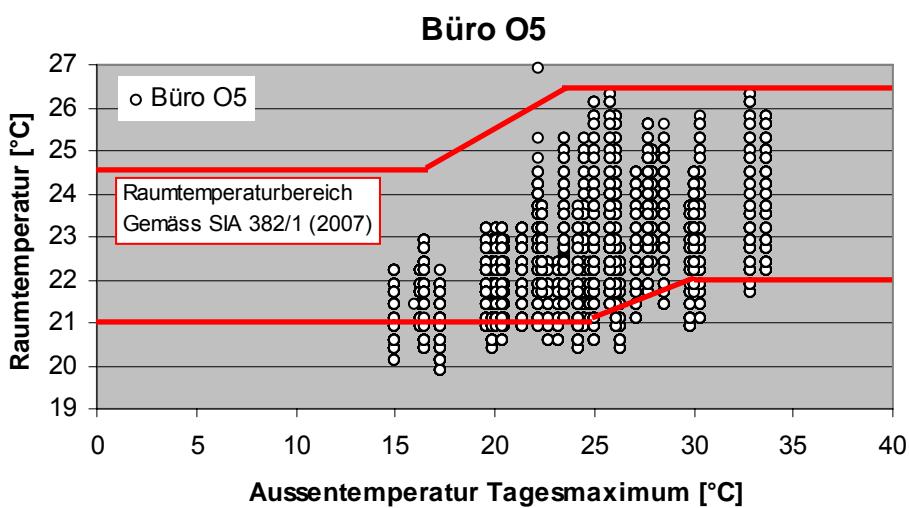


Figur 38: Messung Komfortbedingungen



Figur 39: Messung Anlagenbetrieb

Wie in Figur 40 ersichtlich ist, bewegen sich die Raumtemperaturen während der Messperiode vom 14.7-29.8.2007 in einem Raum in exponierter Lage (Eckbüro Richtung Süd-West) nie ausserhalb der obersten Komfortgrenze gemäss SIA 382/1, 2007 [3]. Bei Abwesenheit, vor Allem am Morgen, sind die Raumtemperaturen zeitweise eher zu niedrig.



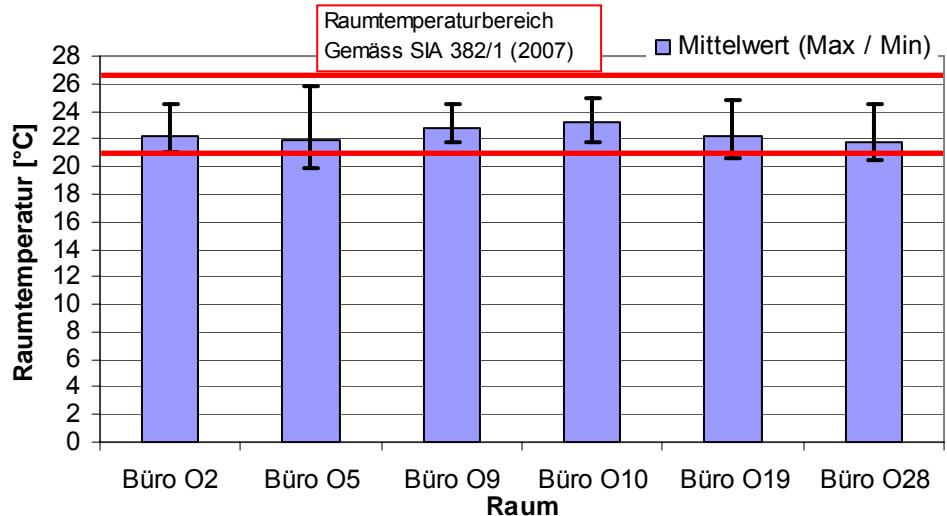
Figur 40: Gemessene Raumtemperatur in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur für einen exponierten Raum

Insgesamt wurde in sechs Räumen die Messung von Raumtemperatur und Feuchte durchgeführt (Raumcharakterisierung siehe Tabelle 23). Figur 41 zeigt die in den sechs Räumen gemessenen mittleren Raumtemperaturen über die Messperiode, sowie die Maxima und Minima. Es zeigt sich, dass der

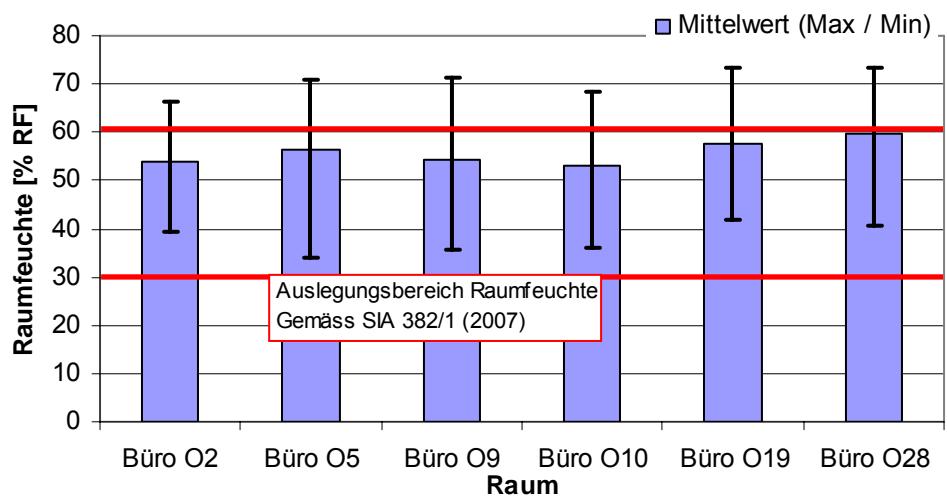
Temperaturbereich gemäss SIA 382/1 (2007) grösstenteils eingehalten wird. Die Abweichungen (Raum O5 und O28) sind primär durch zu niedrige Temperaturen verursacht. Figur 42 zeigt die in den sechs Räumen gemessenen mittlere Raumfeuchte über die Messperiode, sowie die Maxima und Minima. Da keine Entfeuchtung der Zuluft oder Raumluftr erfolgt, liegen die gemessenen Feuchtwerte häufiger an der Grenze oder über dem Auslegungsbereich gemäss SIA 382/1.

| Raum | O2 | O5 Eckbüro | O9 | O10 | O19 | O28 |
|--------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| Orientierung | West | West + Süd | Ost | Ost | Nord | Süd |
| Belegung | Einzelbüro | 3 Personen | Zweiertbüro | Zweiertbüro | Zweiertbüro | Einzelbüro |

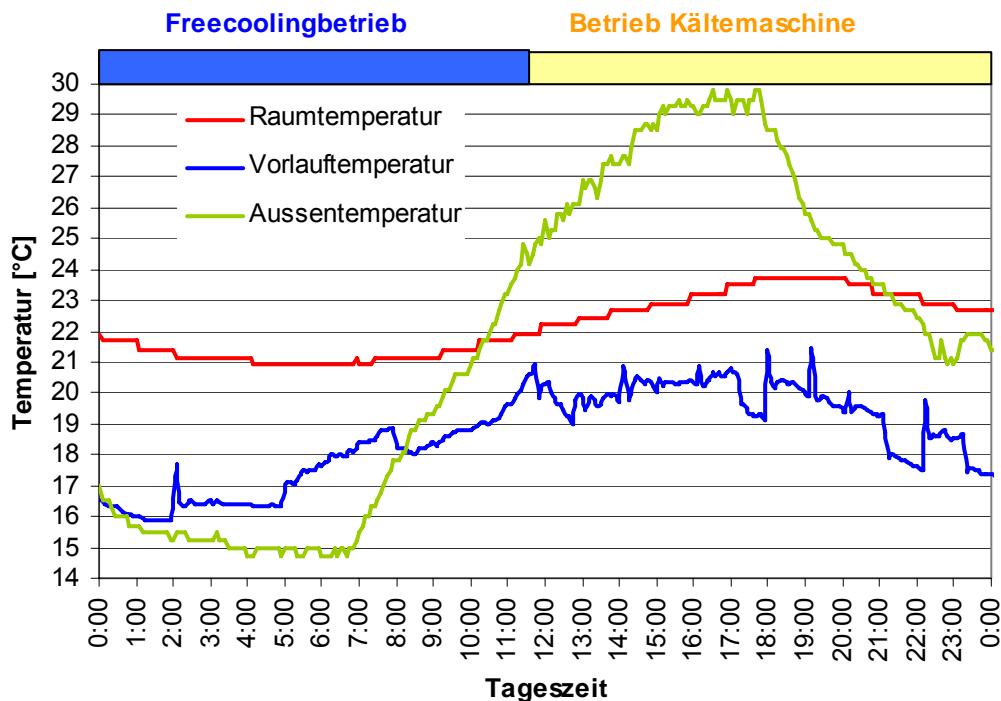
Tabelle 23 Charakterisierung der untersuchten Räume



Figur 41: Gemessene Raumtemperaturen in den untersuchten Räumen (Mittelwert, Maxima, Minima)

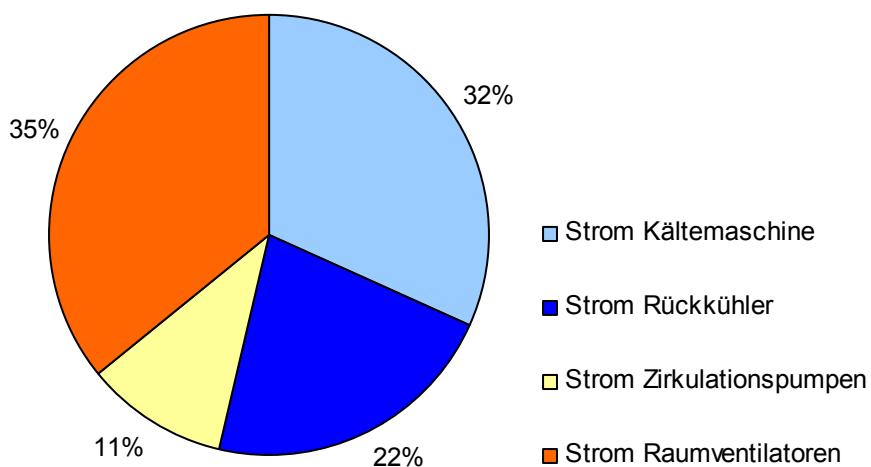


Figur 42: Gemessene Raumluftfeuchten in den untersuchten Räumen (Mittelwert, Maxima, Minima)



Figur 43: Tagesverlauf Kältebetrieb an einem heißen Tag mit hohem Anteil von Freecooling

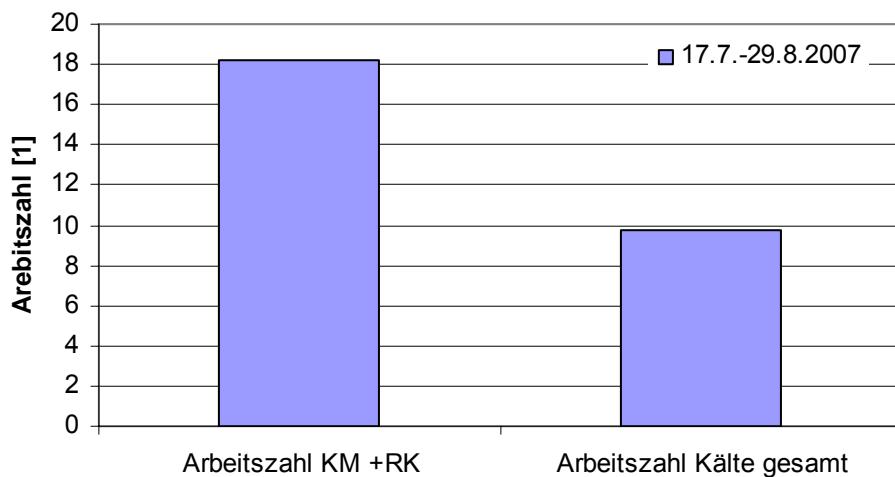
In Figur 43 wird der Kältebetrieb im Tagesverlauf für einen heißen Tag aufgezeigt. Das Außentemperaturmaximum liegt bei 30°C, das Minimum bei 15 °C. In diesem Fall kann viel Freecooling genutzt werden da der Unterschied zwischen Raum- und Außentemperatur in der Nacht genügend gross ist. Etwa die Hälfte des Tages kann die Kälte mit Freecooling produziert werden.



Figur 44: Strombedarf der Kälteerzeugung (Messperiode 17.7-29.8 2007)

Der Strombedarf der Kälteerzeugung und –verteilung wird in Figur 44 aufgezeigt. Auffallend ist, dass die Raumventilatoren einen grossen Teil des Gesamtstrombedarfs ausmachen. Dies ist unter anderem die Folge daraus, dass die Arbeitszahl der Kälteerzeugung hoch ist und demzufolge andere Verbraucher einen grösseren Teil des Gesamtenergiebedarfs ausmachen als bei herkömmlichen Systemen. Die Raumventilatoren werden mit 48 V DC betrieben und sind mit externen Transformatoren verbunden. Der Strombedarf wurde nicht direkt bei den Brüstungsgeräten (DC Seite) erfasst sondern auf der Wechselstromseite. Im gemessenen Strombedarf für die Raumventilatoren, Figur 44 sind die Transformatorverluste enthalten. Die Verlustleistung der Transformatoren wurde separat gemessen. Über die gesamte Messperiode wurde ein Verlustanteil der Transformatoren von 8% des Strombe-

darfs für die Raumventilatoren bestimmt. Bezogen auf den gesamten Strombedarf für die Kälteerzeugung und -Verteilung liegt der Verlustanteil der Transformatoren bei 3%.



Figur 45: Arbeitszahl der Kälteerzeugung sowie des Gesamtsystems (Messperiode 17.7.-29.8.2007)
KM- Kältemaschine, RK- Rückkühler

Aus dem Strombedarf und der Kälteproduktion wurde die Arbeitszahl über die Messperiode berechnet. Die Resultat sind in Figur 45 aufgezeigt. Durch den hohen Anteil Freecooling im Betrieb und die energieeffiziente Kälteverteilung und –Abgabe wird für das Gesamtsystem eine Arbeitszahl von etwa 10 erreicht. Für die Kälteerzeugung alleine (Kältemaschine, Rückkühler) liegt die Arbeitszahl sogar bei einem Wert von 18. Auswertungen zeigen, dass die Arbeitszahl insbesondere von der Feuchtkugeltemperatur der Außenluft abhängig ist. Diese ist bestimmd für den Anteil, der Kälteproduktion, welcher mittels Freecooling erzeugt werden kann.

Wichtig für die hohe Effizienz ist auch die hohe Vorlauftemperatur im Verbraucherkreis. Über die Messperiode betrug die Vorlauftemperatur im Mittel 17.8°C und die Rücklauftemperatur 19.9°C (Temperaturdifferenz im Mittel 2.1°C).

Für den Betrieb des adiabaten Rückkühler wird normales Leitungswasser verwendet (keine Wasser- aufbereitung). Der spezifische Wasserbedarf in der Messperiode betrug 7.6 Liter pro kWh Kälte (bzw. 1.44 Liter pro Tag und m² gekühlter Fläche).

8 Diskussion und Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Arbeit wurden für die Sanierung von Büro- und Verwaltungsgebäude Möglichkeiten zu einer effizienten Kühlung und deren bauliche Integrierbarkeit aufgezeigt.

Ein effizientes Abgabesystem wurde definiert durch die Wahl von Wasser- oder Luft/Wasser-Systemen mit einer Wasser-Mindestvorlauftemperatur im Raum von 18°C sowie ein möglichst hoher Faktor zwischen produzierter Kühlenergie und dem benötigten Elektrizitätsverbrauch zur Kälteabgabe.

Bei den Erzeugersystemen sollte die Produktion von 18°C Kaltwasser möglich sein, auch hier ist ein möglichst hoher Faktor zwischen produzierter Kühlenergie und dem benötigten Elektrizitätsverbrauch zur Kälteproduktion anzustreben.

Eine hohe Wasservorlauftemperatur im Raum ermöglicht die Nutzung von Freecooling durch natürliche Wärmesenken wie Luft, Erde, Grundwasser etc. Ebenfalls bei Kältemaschinen erlaubt diese Strategie einen effizienten Betrieb. Durch die hohe Temperatur ist die Behaglichkeit in den Räumen sichergestellt, keine Zugerscheinungen oder grosse Strahlungssymmetrien entstehen.

Die dargestellten Kennzahlen beziehen sich auf einen Typenbeispiel. Da jedes Gebäude unterschiedlich ist, um so mehr es sich hier um Sanierungen handelt, können sie nicht einfach auf ein anderes Gebäude übertragen werden. Die Kennzahlen zeigen jedoch eine Tendenz bezüglich der Rangordnung der Systeme. Verbesserungen der Kennzahlen können vor allem durch die optimale Nutzung der Gebäudemasse, wenn möglich auch nachts, die Zulassung von einer hohen Raumtemperaturspreizung, sowie die genaue Auslegung des Verteilsystems erreicht werden. Beim Verteilsystem ist es wichtig auf die Pumpendimensionierung zu achten. Häufig werden unzweckmäßig grosse Pumpenleistungen eingesetzt, die dazu führen, dass die Pumpen nicht mit optimaler Effizienz betrieben werden. Eine genaue Planung, mit Berücksichtigung des gesamten Kühlsystems (Erzeuger, Rückkühler, Verteilsystem und Abgabesystem), sowie eine langfristige Betriebsoptimierung, ist zwingend für eine energie- und kosteneffizienten Betrieb. Ein geeignetes Messsystem zum Erfassen der Systemeffizienz ist unumgänglich.

Die bauliche Integrierbarkeit der verschiedenen Systeme wurde in einer Diplomarbeit näher untersucht. Es wurden unterschiedliche Gebäudetypen identifiziert und unter Berücksichtigung der baulichen Integrierbarkeit von Kühlsystemen typisiert. Die durchgeföhrte Typisierung von Bestandsgebäuden in unterschiedlichen Gebäudetypen, bezieht sich ausschliesslich auf die Bauweise und Konstruktion des Gebäudes vor und nach einer Sanierung.

Die Gebäudetypisierung bildet eine gute Grundlage für die Untersuchung der baulichen Integrierbarkeit von Abgabesystemen. Bei der Auswahl der Abgabesysteme sind die konstruktiven Gegebenheiten der einzelnen Gebäudetypen ausschlaggebend für die entscheidenden Auswahlkriterien dar. Auf Basis der durchgeföhrten Gebäudetypisierung konnten die konstruktiven Charakteristika der einzelnen Gebäudetypen in Form einer Rose in eine Entscheidungshilfe integriert werden. Mit Hilfe dieses formalisierten Entscheidungsprozesses können die Auswahlkriterien der Abgabesysteme schrittweise abgehendelt werden. Als Ergebnis, nach Abklärung der konstruktiven Gegebenheiten des sanierten Gebäudes, erhält man eine reduzierte Auswahl an einsetzbaren Systemen. Kennzahlen über deren Effizienz und Kosten bilden eine Entscheidungsgrundlage.

Die Entscheidungshilfe für Abgabesysteme sowie Beschriebe und Kennzahlen für Erzeugersysteme sind in einer Broschüre für Bauherren und Architekten zusammengefasst. Sie soll eine Alternative zu den bis heute überwiegend bei Gebäudesanierungen eingesetzten konventionellen Klimaanlagen aufzeigen, und Hilfswerkzeug in der Diskussion mit Planern darstellen.

Durch die Messungen am Kühlsystem bei Basler und Hofmann, Ingenieure und Planer AG, Zürich, Standort Rehalp, wurde ein Beispiel dargestellt, das den in diesem Bericht dargelegten Grundsätzen entspricht. Eine sehr hohe Arbeitszahl, 18, wird für die Kälteproduktion während der Messperiode erreicht. Für das Gesamtsystem wird eine hohe Arbeitszahl von 10 erreicht. Die Gesamteffizienz könnte mit einer weitergehenden Betriebsoptimierung noch gesteigert werden.

Weitere effiziente Systeme für Kälteabgabe sowie -Erzeugung sind in der Entwicklung. Der Einsatz von Phasenwechselmaterialien (PCM) in Kühlsystemen, z.B. in Kühldecken, bildet für Sanierungen eine interessante Alternative. Durch den Einsatz von PCM kann die aktive Masse und damit die Effizienz erhöht werden, ohne dass viel Platzverlust in Kauf genommen werden muss.

Eine weitere Technik im Aufstieg ist das DEC-System zur Bereitstellung von gekühlter Zuluft. Vor allem die Kombination mit Solaranlagen hat ein hohes Potential, bedarf aber einer Weiterentwicklung.

Einige Anbieter haben die Herausforderung des Zusammenspiels von Kältemaschine und Rückkühler erkannt. Sie bieten deshalb Systemkombinationen an, welche aufeinander abgestimmt sind. Solche Anbieter gibt es unter anderem für kleine Adsorptionskältemaschinen sowie für Kompressionskältemaschinen.

9 Referenzen

- [1] Brunner et al.: **Bauen wenn das Klima wärmer wird**, Faktor Verlag, 2008
- [2] Wyon, D., et al. diverse Publikationen
- [3] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, **SIA 382/1 Lüftungs- und Klimaanlagen – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen**, 2007
- [4] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, **SIA 180 Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau**, 1999
- [5] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, **SIA 380/1 Thermische Energie im Hochbau**, 2007
- [6] AEE Intec Arbeitsgemeinschaft erneuerbare Energien, **COOLSAN Kältetechnische Sanierungskonzepte für Büro- und Verwaltungsgebäude**, Berichte aus Energie und Umweltforschung 25/2005 Haus der Zukunft. <http://www.hausderzukunft.at/publikationen/view.html?id57>
- [7] Wellig, B., Kegel, B., **Verdoppelung der Jahresarbeitszahl von Klimakälteanlagen durch Ausnutzung eines kleinen Temperaturhubes**, Bundesamt für Energie, 2006
- [8] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, **SIA Merkblatt 2021 Gebäude mit hohem Glasanteil**, 2002
- [9] Filleux, Dr. Ch. et al., **Grundsätzliche Abklärungen über Systeme zur Lüftung und Heizung bzw. Kühlung von Gebäuden**, 1990, S. 21 ff
- [10] Recknagel, H. et al., **Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik**, 2007, S. 1756 ff
- [11] International Energy Agency (IEA) - **Solar Heating and Cooling Programme (shc), task 25: Solar assisted Air Conditioning of Buildings**, workshop poster.
- [12] Dipl.-Arch. H. Wegmann, Stücheli Architekten, Zürich
- [13] Bine Info II/1998 **KWKK-Kraft Wärme Kälte Kopplung**
- [14] Telefonische Aussage Hr Binz, ewb, 19.12.08
- [15] Primas A. **Ökologische Bewertung neuer WKK-Systeme und Systemkombinationen**, Bundesamt für Energie, 2008...
- [16] Henning, Dr. H-M, **Solare Klimatisierung-Stand der Entwicklung**, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2004, AEE Intec Arbeitsgemeinschaft erneuerbare Energien
- [17] Henning, Dr. H-M, **Realisierte solare Kühlanlagen und Nutzungspotentiale**, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, AEE Intec Arbeitsgemeinschaft erneuerbare Energien

10 Anhang 1

10.1 BERECHNUNGSHINTERGRUND ABGABESYSTEME

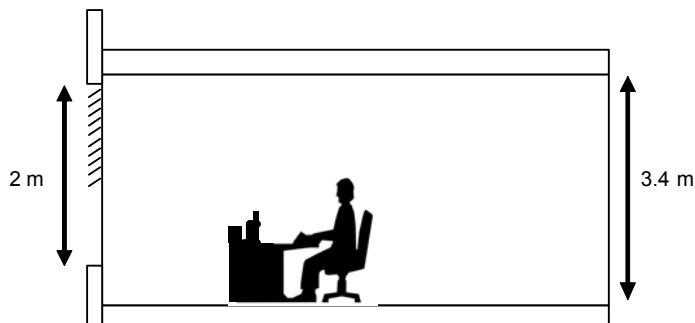
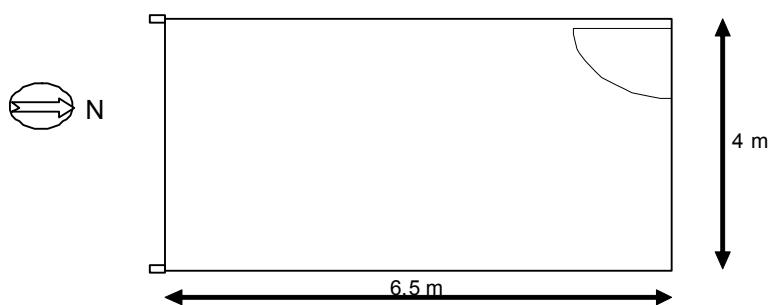
10.2 REFERENZRAUM

| | |
|---------------------|-----------------------|
| Raumtemperatur | 26.5 °C |
| Raumluftheutre | 50 % |
| VL/RL | 18/20 °C |
| Kühlleistung | 30 W/m ² |
| Aktive Gebäudemasse | 350 kg/m ² |

Druckverlust des Systems bitte angeben

Geometrie

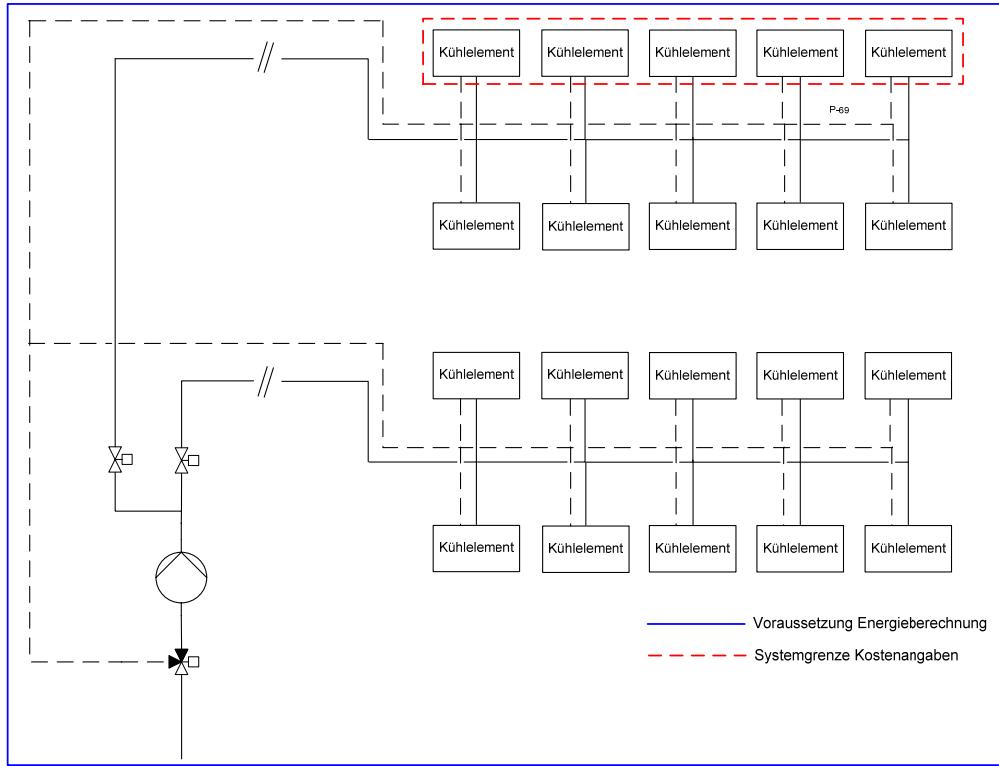
Energiebezugsfläche 26 m²



10.3 HILFSENERGIEBERECHNUNG

Der Druckverlust wurde mit der Idea Rohnetzberechnung von HS Luzern berechnet.

Die Systemgrenze für die Energieverbrauchsberechnung wurde gemäss Figur 46 gesetzt. Um eine fiktive Pumpenauslegung zu ermöglichen wurden 20 Referenzräume auf zwei Stränge verteilt für eine Verteilpumpe angenommen. Der Druckverlust der verschiedenen Abgabesysteme wurde aus Herstellerangaben genommen.



Figur 46: Abgabesysteme: Systemgrenze für Energieverbrauchsberechnung

Die Pumpenenergie wurde mit dem Auslegungsprogramm von Grundfos gerechnet. Dabei wurden folgende Betriebsstunden angenommen:

| Leistung | Betriebsstunden |
|--------------|-----------------|
| 25% | 32 |
| 40% | 986 |
| 60% | 374 |
| 100% | 64 |
| <i>Total</i> | 1456 |

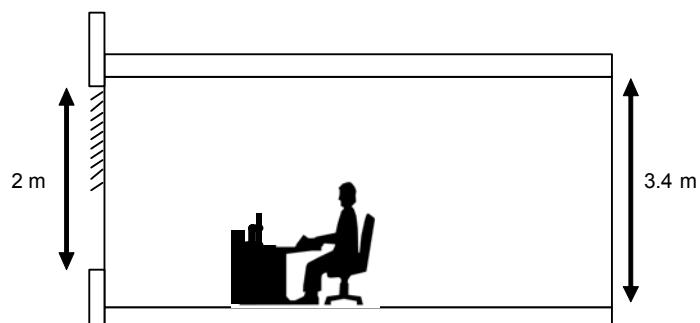
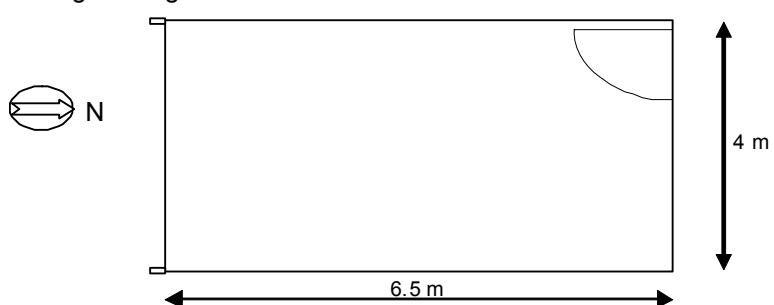
10.4 OPTIMIERTES BRÜSTUNGSGERÄT

Referenzraum

| | |
|---------------------|--------------------------------------|
| Raumtemperatur | 26.5 °C |
| Raumlufteuchte | 50 % |
| VL/RL | 19/23 °C (Tag) 16/20 °C (Nacht) |
| Kühlleistung | 30 W/m ² |
| Aktive Gebäudemasse | 350 kg/m ² |
| Vollaststunden | 800 h |

Geometrie

Energiebezugsfläche 26 m²



11 Anhang 2

11.1 BERECHNUNGSGRUNDLAGE ERZEUGERSYSTEME

Auslegungsdaten Kälteerzeugung

| | | | |
|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|---------|
| Leistungsgrössen: | 75 kW | 255 kW | 660 kW |
| Anteil interne Lasten: | 40% | | |
| Kühlgrenze: | Aussenlufttemperatur = 17°C | | |
| Auslegungsfall: | 26°C / 52% RF | (SIA V 382/2, 1992, Zürich, Herbst) | |
| Kühllastkurve: | <i>Anteil der Vollast</i> | <i>Aussenlufttemperatur /-Feuchte</i> | |
| | 25% | Ta = 17 °C | RF=72 % |
| | 50% | Ta = 20 °C | RF=61 % |
| | 75% | Ta = 22 °C | RF=54 % |
| | Vollast | Ta > 27°C | RF=43 % |
| Kaltwassertemperaturen | 18/22 °C | | |
| Lärmempfindlichkeitsstufe: | III | | |

12 Anhang 3

12.1 MESSUNGEN BASLER & HOFMANN REHALP

Die Messungen fanden im Sommer 2007 statt (zwischen 14.7.2007 und 30.8.2008). Die meisten Auswertungen beziehen sich auf die Periode zwischen 17.7.2007 bis 1.8.2008 und 6.8.208 und 30.8.2008, da in dieser Zeit für alle relevanten Messgrößen Werte verfügbar sind. Die Auswertungen beinhalteten folgende Messpunkte:

| Messort | Messgröße | Einheit |
|-------------------------------|--|---------|
| Aussenluft | Temperatur | °C |
| Aussenluft | Feuchte | %RF |
| Büro O2 | Temperatur | °C |
| Büro O2 | Feuchte | %RF |
| Büro O5 | Temperatur | °C |
| Büro O5 | Feuchte | %RF |
| Büro O9 | Temperatur | °C |
| Büro O9 | Feuchte | %RF |
| Büro O10 | Temperatur | °C |
| Büro O10 | Feuchte | %RF |
| Büro O19 | Temperatur | °C |
| Büro O19 | Feuchte | %RF |
| Büro O28 | Temperatur | °C |
| Büro O28 | Feuchte | %RF |
| Strombedarf KM + RK | Gesamtstrombedarf Kältemaschine, Rückkühler, intern Pumpen | W |
| Strombedarf Ventilator | Steuersignal Rückkühlventilator *) | V *) |
| Vorlauf Verbraucherkreis | Hauptvorlauf Verbraucherseite der Kälteerzeugung | °C |
| Rücklauf Verbraucherkreis | Hauptrücklauf Verbraucherseite der Kälteerzeugung | °C |
| Strombedarf Pumpen | Strombedarf der Zirkulationspumpen Nord + Süd | W |
| Strombedarf Ventilator Nord | Strombedarf Raumventilatoren Nordteil 1.OG, AC-Seite | W |
| Strombedarf Ventilator Süd | Strombedarf Raumventilatoren Südteil 1.OG, AC-Seite | W |
| Einstrahlung Büro O10 | Messung der Raumhelligkeit als Mass für Einstrahlung **) | V **) |
| Einstrahlung Büro O2 | Messung der Raumhelligkeit als Mass für Einstrahlung **) | V **) |
| Einstrahlung Büro O5 | Messung der Raumhelligkeit als Mass für Einstrahlung **) | V **) |
| Einstrahlung Büro O9 | Messung der Raumhelligkeit als Mass für Einstrahlung **) | V **) |
| VL Verbraucherkreis Nord ***) | Vorlauf Verbraucherseite Nord der Kälteerzeugung | °C |
| RL Verbraucherkreis Nord ***) | Rücklauf Verbraucherseite Nord der Kälteerzeugung | °C |
| VL Verbraucherkreis Süd ***) | Vorlauf Verbraucherseite Süd der Kälteerzeugung | °C |
| RL Verbraucherkreis Süd ***) | Rücklauf Verbraucherseite Süd der Kälteerzeugung | °C |

*) Anhand einer aufgenommenen Leistungskurve wurde der momentane Leistungsbedarf bestimmt

**) Anhand einer aufgenommenen Einstrahlungskurve für jeden Raum kann die ungefähre Einstrahlung bestimmt werden

***) Messdaten nur für eine beschränkte Periode verfügbar

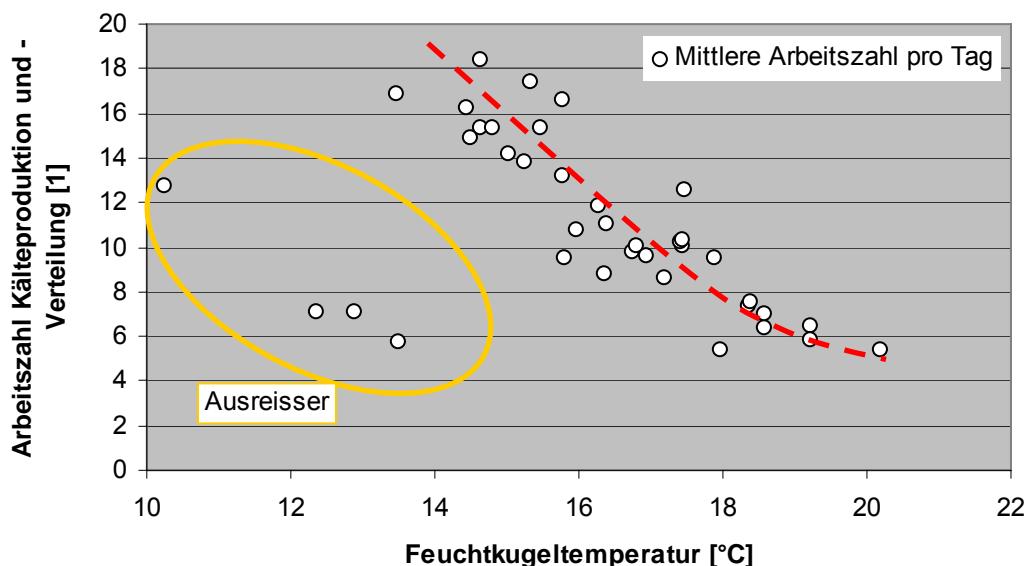
Tabelle 24 Erfasste Messgrößen

In Tabelle 25 sind die Messresultate zu den Energiedaten zusammengefasst.

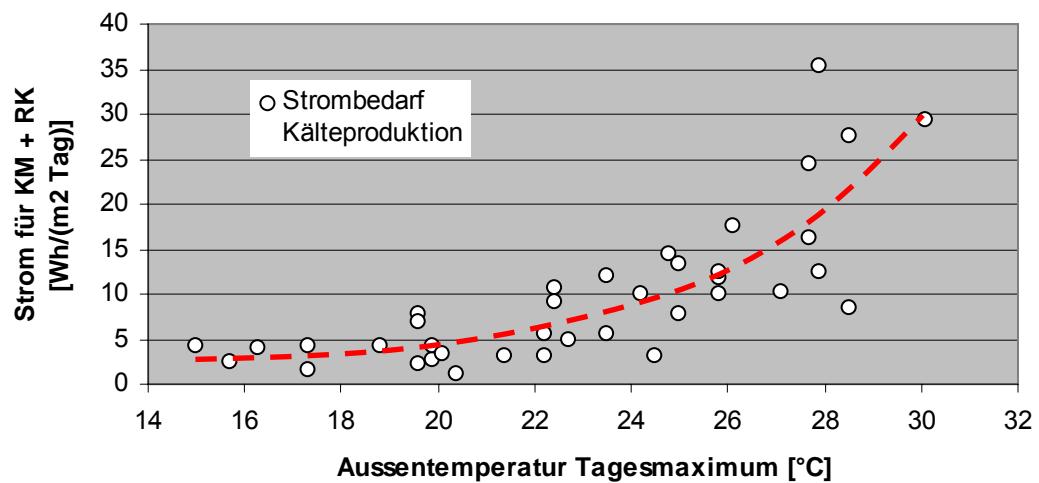
Beginn Periode: 17.7.2007 11:30
 Ende Periode: 30.8.2007 0:00
 excl: Perioden mit fehlenden Messdaten (v.A. 1.8.-6.8.)

| | | |
|------------------------------------|---------------|--|
| EBFo | 4'274 | m ² |
| gekühlte Fläche | 2'528 | m ² |
| Messdauer | 35 | Tage |
| Strom Kältemaschine + Rückkühler | 927 | kWh |
| Strom Kältemaschine | 548 | kWh |
| Strom Rückkühler | 379 | kWh |
| Strom Zirkulationspumpen | 183 | kWh |
| Strom Raumventilatoren | 620 | kWh |
| davon Strom Raumventilatoren DC | 571 | kWh |
| davon Anteil Transformatorleerlauf | 50 | kWh |
| Strombedarf Kälteerzeugung | 1'731 | kWh |
| spez Strombedarf Kälteerzeugung | 0.68 | kWh/m ² gekühlte Fläche |
| Strombedarf Kälteerzeugung | 49 | kWh/Tag |
| Kälteproduktion | 16'921 | kWh |
| spez Kälteproduktion | 6.69 | kWh/m ² gekühlte Fläche |
| spez Kälteproduktion | 0.189 | kWh/m ² Tag |
| Arbeitszahl Gesamtsystem | 9.78 | [1] |
| Arbeitszahl Nur KM und RK | 18.25 | [1] |
| Wasserbedarf | 129 | m³ |
| Wasserbedarf Kälteerzeugung | 3.65 | m ³ /Tag |
| spezifischer Wasserbedarf | 1.44 | l/Tag und m ² gekühlte Fläche |
| spezifischer Wasserbedarf | 7.63 | l/kWh Kälteproduktion |

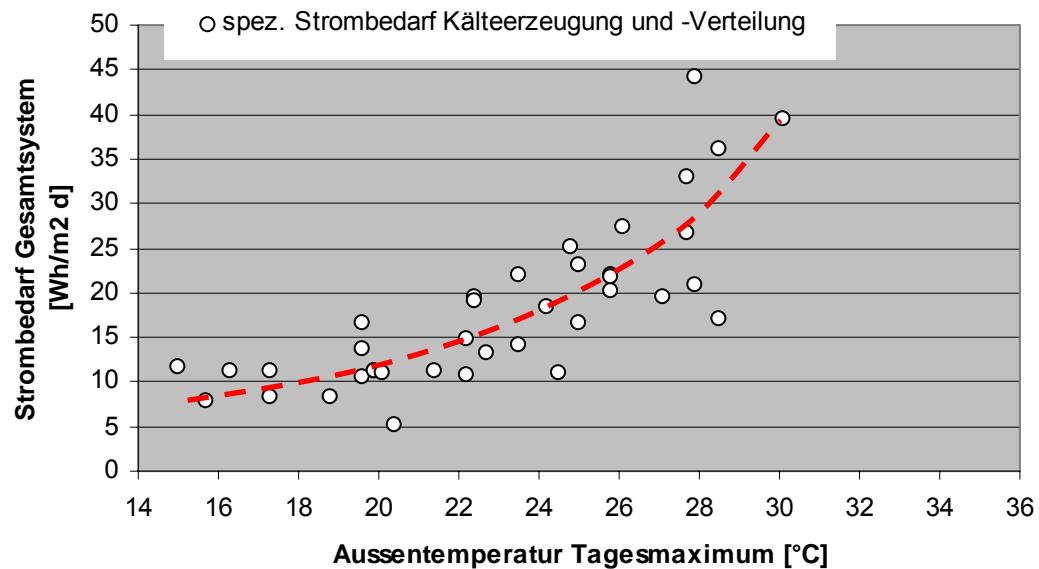
Tabelle 25 Zusammenfassung der Messresultate (Messperiode 17.7-29.8 2007)



Figur 47: Arbeitszahl Gesamtsystem (Erzeugung und Verteilung) in Abhängigkeit von der Feuchtkugeltemperatur der Außenluft



Figur 48: Strombedarf der Kälteproduktion (Kältemaschine + Rückkühler) in Abhängigkeit des Tagesmaximum der Außentemperatur

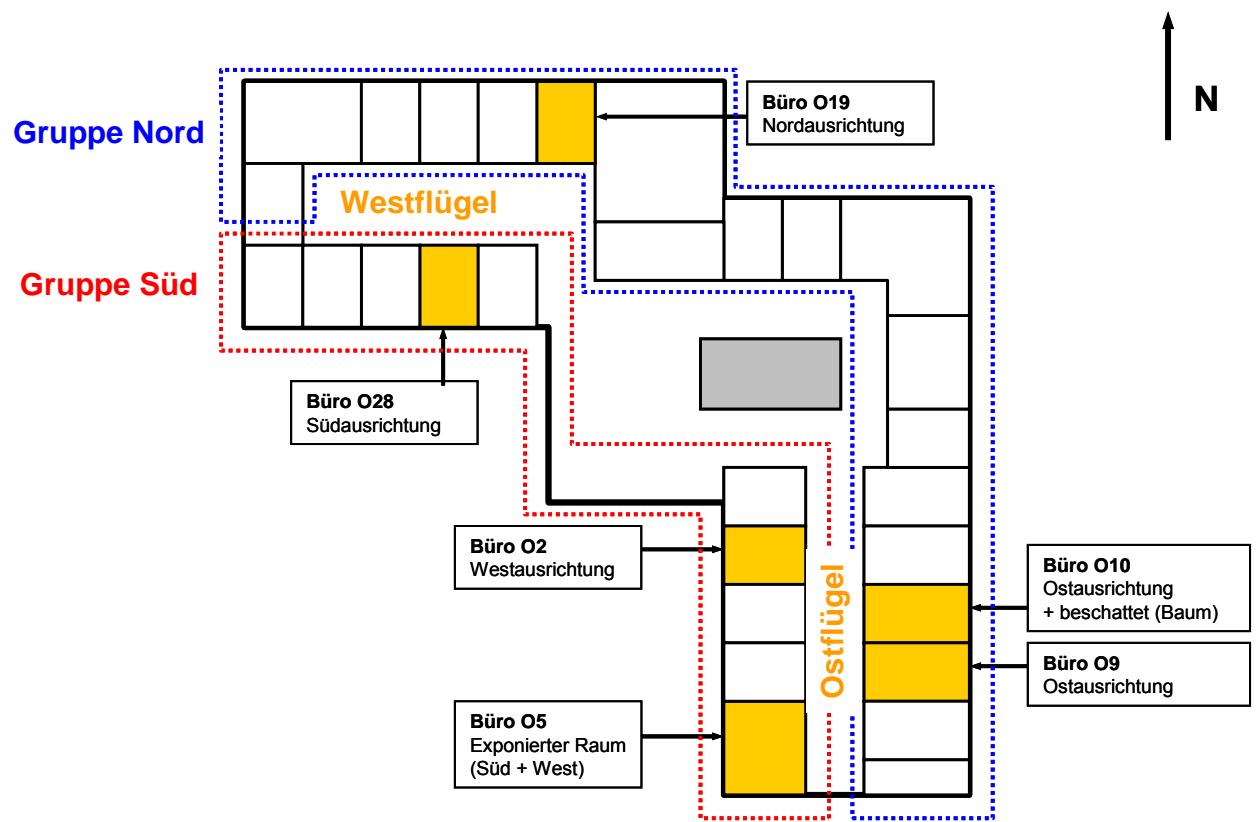


Figur 49: Strombedarf des Gesamtsystems (Erzeugung und Abgabe) in Abhängigkeit des Tagesmaximum der Außentemperatur

| Periode: | Verbrauch | | | |
|---------------|-----------|----------|---------|----------------------|
| | absolut | pro Jahr | pro Tag | pro Tag *) |
| | m3 | m3/Jahr | l/Tag | l/m ² Tag |
| 8.2005-8.2007 | 1065.096 | 533 | 1'459 | 0.58 |
| 6.2007-9.2007 | 238.551 | | 3'133 | 1.24 |
| 9.2007-7.2008 | 323.205 | | 1'071 | 0.42 |
| 7.2008-9.2008 | 312.763 | | 5'032 | 1.99 |

*) spezifischer Verbrauch Bezogen pro m² gekühlte Fläche

Tabelle 26 Messwerte für Wasserbedarf des adiabaten Rückkühlers

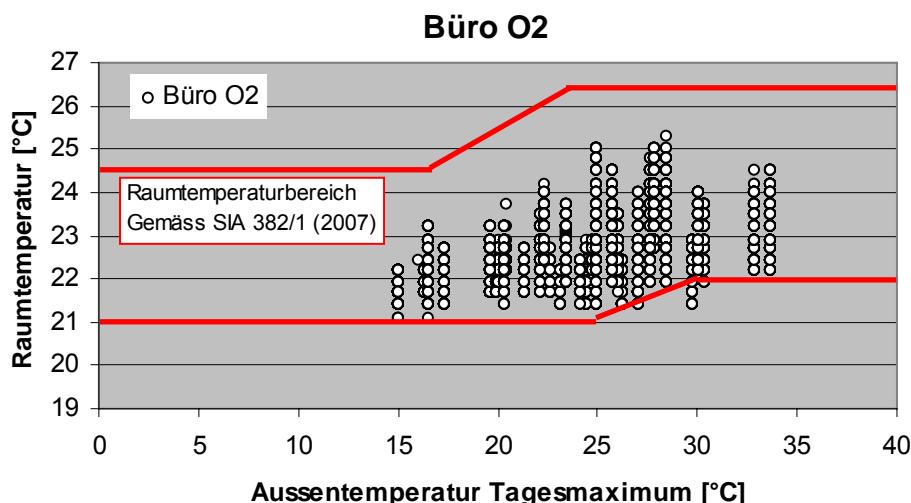


Figur 50: Lage der untersuchten Räume

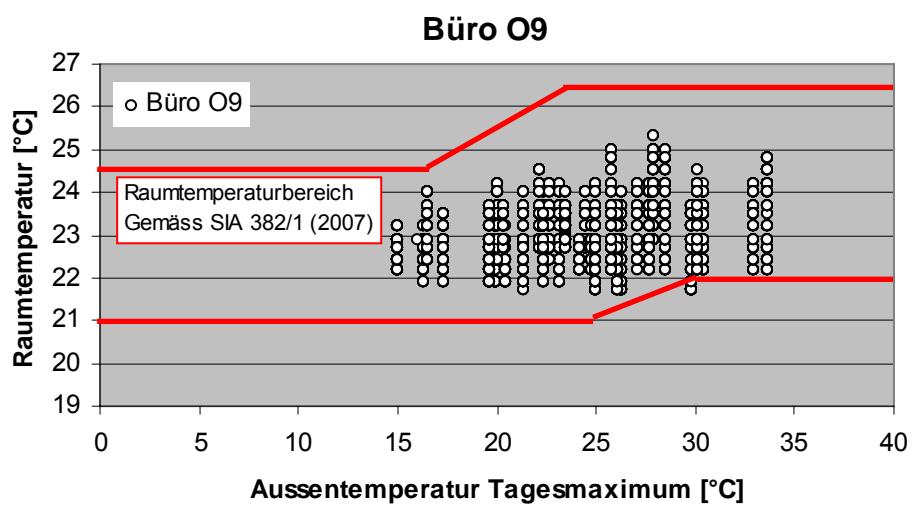
| Messwert | Einheit | Mittelwert | Max | Min | SDAW |
|-------------------------------|-------------------|------------|-------|------|------|
| VL, Kältekreis | Wert (°C) | 17.8 | 22.9 | 10.5 | 2.0 |
| RL, Kältekreis | Wert (°C) | 19.9 | 23.8 | 16.9 | 1.1 |
| dT, Kältekreis | Wert (°C) | -2.1 | -9.8 | 1.0 | 1.3 |
| Feuchtkugeltemperatur, Aussen | Temp. (°C) | 15.7 | 24.4 | 8.0 | 2.6 |
| Aussenluft | Temp. (°C) | 17.4 | 30.1 | 8.6 | 4.1 |
| Aussenluft | Feuchte (%rF) | 80.8 | 100.0 | 36.0 | 17.2 |
| Büro O2 | Raum Temp. (°C) | 22.2 | 24.5 | 21.1 | 0.5 |
| Büro O5 | Raum Temp. (°C) | 21.9 | 25.8 | 19.9 | 1.0 |
| Büro O9 | Raum Temp. (°C) | 22.8 | 24.5 | 21.7 | 0.6 |
| Büro O10 | Raum Temp. (°C) | 23.2 | 25.0 | 21.7 | 0.7 |
| Büro O19 | Raum Temp. (°C) | 22.2 | 24.8 | 20.6 | 0.6 |
| Büro O28 | Raum Temp. (°C) | 21.7 | 24.5 | 20.4 | 0.7 |
| Büro O2 | Feuchte (%rF) | 53.8 | 66.5 | 39.5 | 4.6 |
| Büro O5 | Feuchte (%rF) | 56.5 | 71.0 | 34.0 | 5.7 |
| Büro O9 | Feuchte (%rF) | 54.4 | 71.5 | 35.5 | 6.0 |
| Büro O10 | Feuchte (%rF) | 53.1 | 68.5 | 36.0 | 5.6 |
| Büro O19 | Feuchte (%rF) | 57.6 | 73.5 | 42.0 | 5.2 |
| Büro O28 | Feuchte (%rF) | 59.5 | 73.5 | 40.5 | 5.3 |
| Büro O2 | Einstrahlung W | 38 | 1'388 | 0 | 121 |
| Büro O5 | Einstrahlung W | 98 | 1'492 | 0 | 167 |
| Büro O9 | Einstrahlung W | 88 | 1'041 | 0 | 149 |
| Büro O10 | Einstrahlung W | 67 | 1'572 | 0 | 156 |
| T Aussenluft | Tagesmittel (°C) | 17.3 | 22.6 | 12.4 | 2.4 |
| T Aussenluft | Tagesmax. (°C) | 22.6 | 30.1 | 15.0 | 3.9 |
| T Aussenluft | Tagesmin. (°C) | 13.0 | 16.8 | 8.6 | 1.9 |
| RF Aussenluft | Tagesmittel (%rF) | 80.9 | 99.2 | 63.3 | 9.3 |
| RF Aussenluft | Tagesmax. (%rF) | 98.0 | 100.0 | 84.5 | 3.4 |
| RF Aussenluft | Tagesmin. (%rF) | 56.7 | 91.0 | 36.0 | 14.6 |
| T Aussenluft, 7:00-19:00 | Tagesmittel (°C) | 18.9 | 25.1 | 11.6 | 3.1 |
| T Aussenluft, 7:00-19:00 | Tagesmax. (°C) | 22.3 | 30.1 | 12.6 | 4.1 |
| T Aussenluft, 7:00-19:00 | Tagesmin. (°C) | 14.0 | 18.1 | 10.2 | 2.0 |
| T Aussenluft, 19:00-7:00 | Tagesmittel (°C) | 15.7 | 20.1 | 12.1 | 1.9 |
| T Aussenluft, 19:00-7:00 | Tagesmax. (°C) | 21.2 | 26.9 | 14.7 | 3.4 |
| T Aussenluft, 19:00-7:00 | Tagesmin. (°C) | 13.0 | 16.8 | 8.6 | 1.8 |

Tabelle 27 Temperatur- und Feuchtemesswerte

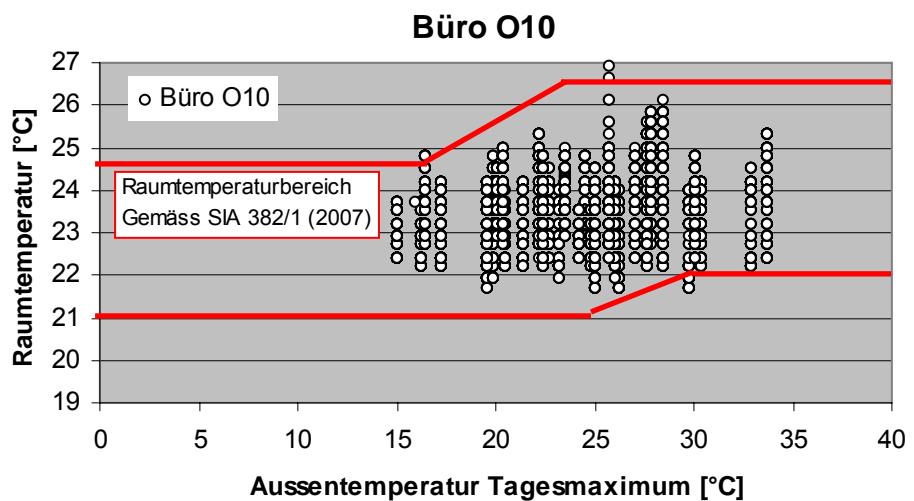
(Mittelwert über Messperiode, Maxima, Minima, Standardabweichung der Messwerte)



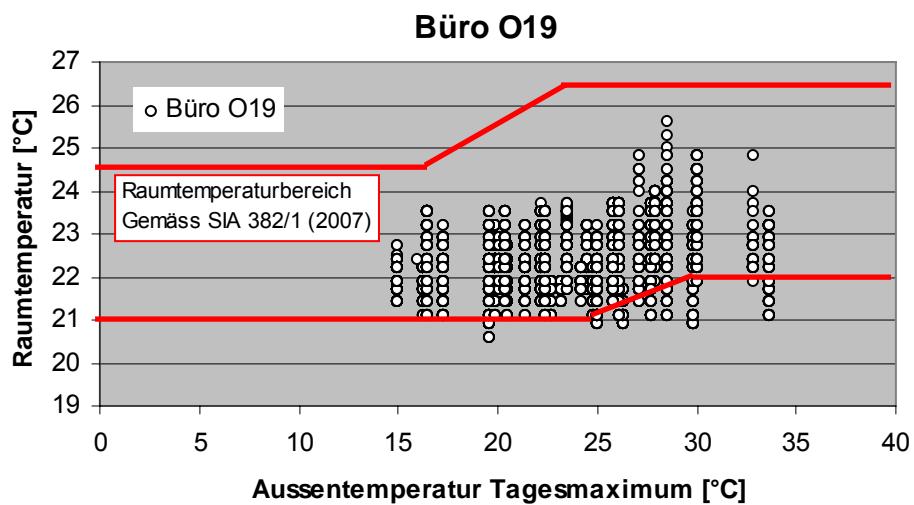
Figur 51: Gemessene Raumtemperatur in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur Raum, O2



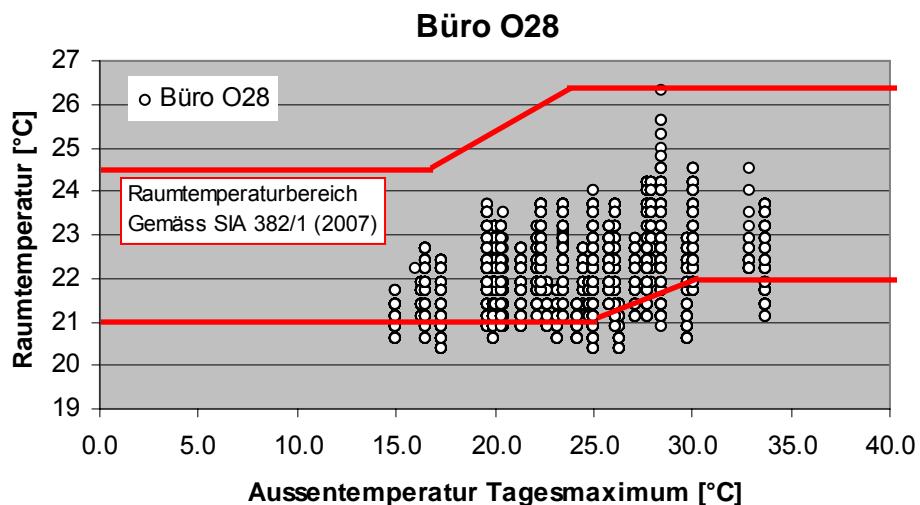
Figur 52: Gemessene Raumtemperatur in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur Raum, O9



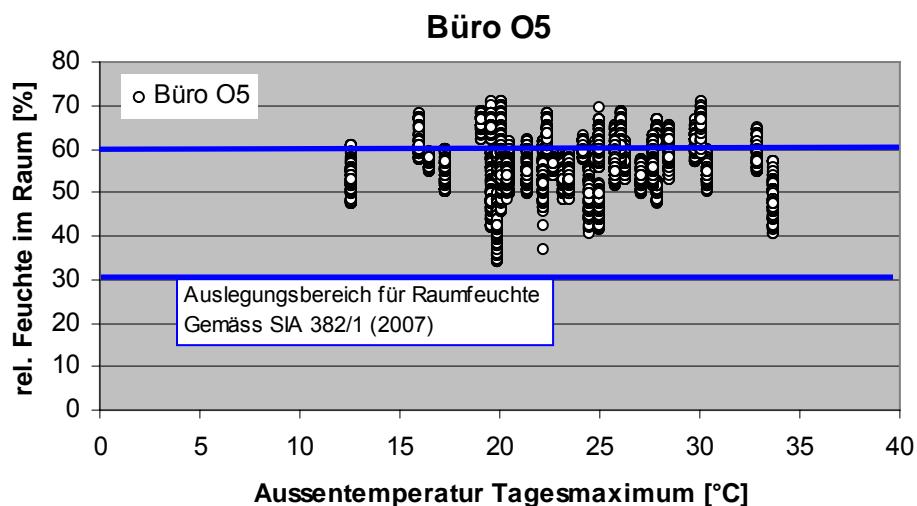
Figur 53: Gemessene Raumtemperatur in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur Raum, O10



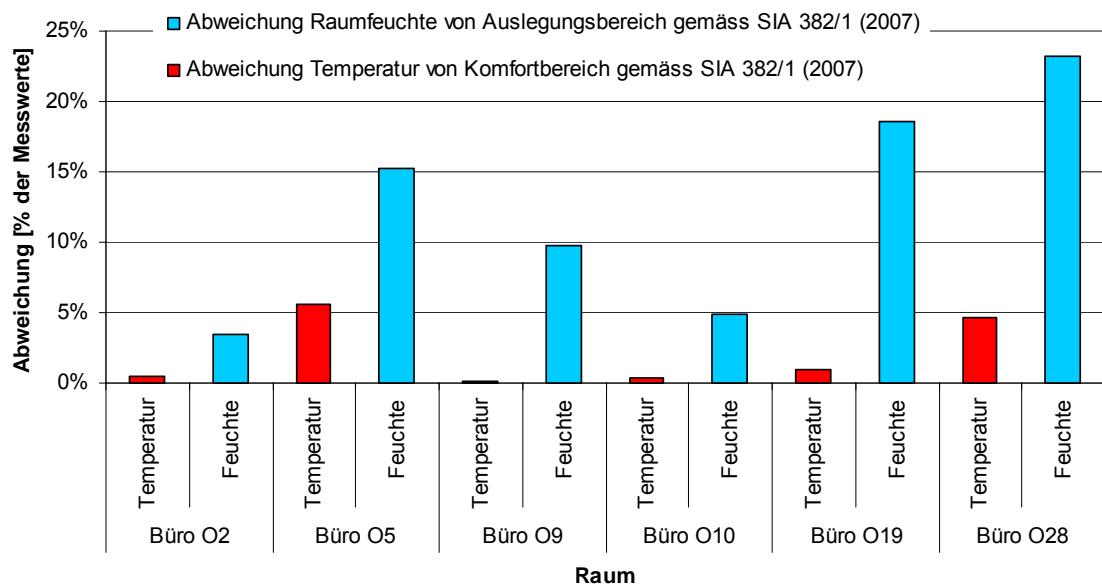
Figur 54: Gemessene Raumtemperatur in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur Raum, O19



Figur 55: Gemessene Raumtemperatur in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur, Raum O28



Figur 56: Gemessene Raumfeuchten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Raum O5



Figur 57: Gemessene Raumluftfeuchten in den untersuchten Räumen (Mittelwert, Maxima, Minima)