



DS-PLAN

Elektrizitätsbedarf von Gebäuden

Methodik zur Erfassung, Beurteilung und Optimierung des Elektrizitätsbedarfs von Gebäuden

Modul 2.3 Klimakälte

Version 2.0

gefördert von



Impressum

Projekt	Methodik zur Erfassung, Beurteilung und Optimierung des Elektrizitätsbedarfs von Gebäuden
Kurztitel	MEG
Gefördert mit Mitteln von	Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) E.ON Energie AG (E.ON) Energienstiftung Schleswig-Holstein (ESSH) Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung (HMWVL)
Auftragnehmer	ARGE ¹ DS-Plan GmbH (DSP) IWU Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU)
Geschäftsadresse	DS-Plan GmbH Schmidtstraße 51 60326 Frankfurt am Main Tel. +49 (0) 69 / 75 80 77 - 79 Fax +49 (0) 69 / 75 80 77 - 65
Verfasser	Dr.-Ing. Jens Knissel Institut Wohnen und Umwelt Annastraße 15 64285 Darmstadt j.knissel@iwu.de
ISBN – Nummer	3-932074-72-6
IWU – Bestellnummer	15/05
Dokument	M:\Phase 1\Kälte\Bericht\MEG Modul 2.3 - Klimakälte 2.0.doc

¹ Das Projekt MEG wurde in Teilprojekt I von Herrn Hörner noch als Mitarbeiter von Amstein+Walthert, Niederlassung Frankfurt, erarbeitet. Mit Beginn von Teilprojekt II und dem Wechsel von Herrn Hörner wurde das Projekt an DS-Plan übertragen.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	5
2	Einführung zum Modul Klimakälte.....	6
2.1	Ausgangslage.....	6
2.2	Anwendungsbereich	6
2.3	Zielsetzung	6
2.4	Begriffe	6
3	Methodik.....	7
3.1	Raumbedarf.....	8
3.2	Anlage.....	9
4	Berechnung	11
4.1	Raumlasten.....	11
4.1.1	Jahresraumkältebedarf.....	11
4.1.2	Befeuchtungsbedarf / Entfeuchtungsbedarf	12
4.2	Anlagentechnik	13
4.2.1	Zonenweise Betrachtung.....	13
4.2.2	Strombedarf der Kälteanlage.....	24
4.2.3	Strombedarf Befeuchtung.....	27
4.3	Kopplung von Lüftungs- und Kältemodul	28
4.3.1	Abschätzen der Betriebszeit.....	29
4.4	Anmerkungen	32
5	Referenzwerte und Beurteilung	33
5.1	Berechnung der Grenz- und Zielwerte	33
5.2	Standardrandbedingungen	35
5.3	Bewertung des Anforderungsniveaus der Grenzwerte	38
6	Literaturverzeichnis	42
7	Formelverzeichnis.....	43
8	Anhang: Ermittlung der Jahresarbeitszahl.....	47

1 Zusammenfassung

Um den erforderlichen Komfort für die Mitarbeiter zu sichern, kann in bestimmten Nutzungszonen eines Gebäudes eine Klimatisierung erforderlich sein. Die Quantifizierung des Strombedarfs zur Klimatisierung war bisher nur mit aufwendigen dynamischen Simulationsrechnungen möglich. Aufgrund des zusätzlichen Kosten- und Zeitaufwandes wurden in der Regel nur kritische Räume in extremen Hitzeperioden untersucht. Eine Bilanzierung des gesamten Gebäudes erfolgte nicht. In dem Modul 2.3 Klimakälte wird ein einfaches Verfahren zur Abschätzung des Strombedarfs zur Klimatisierung entwickelt. Damit wird ein Hilfsmittel für die Beurteilung und Optimierung des Strombedarfs Klima gegeben.

Die Anwendung des Kurzverfahrens erstreckt sich auf Komfortklimaanlagen in Deutschland. Mit dem hier vorgestellten Verfahren wird der Einfluss der einzelnen Gebäude- und Anlagenparameter auf den Strombedarf ermittelt. Es können somit prinzipielle Entscheidungen auf der Konzeptebene getroffen werden. Die Berechnungen ersetzen jedoch keine Gebäude- und Anlagensimulation.

Die Berechnung des Strombedarfs zur Klimatisierung kann in zwei große Blöcke untergliedert werden, die nacheinander abgearbeitet werden:

1. Zone/Raum: Berechnung des Raumbedarfs zum Einhalten der Komfortanforderungen (Temperatur, Feuchte)
2. Anlage: Stromaufwand der Anlage, um den Raumbedarf zu decken

Zur Berechnung des Raumbedarfs wird das Monatsbilanzverfahren [Elsberger 2000] verwendet. Neben dem Raumkältebedarf und der maximalen Kältelast erlaubt dieses Verfahren auch die Berechnung des Entfeuchtungs- und Befeuchtungsbedarfs. Das Verfahren baut auf der EN 832 auf und ist damit in weiten Bereichen kongruent zur Berechnung des Heizwärmebedarfs. Die Rechengenauigkeit wurde in Modul 1.3 im Rahmen einer Parameterstudie getestet.

Schwerpunkt des vorliegenden Moduls 2.3 ist die Modellierung der Anlagentechnik zur Kühlung, Ent- und Befeuchtung. Es wird ein Ansatz entwickelt und im Detail beschrieben.

In der Planung von Neubauten oder bei der energetischen Sanierung ist es hilfreich, die eigenen Ergebnisse mit Grenz- und Zielwerten vergleichen zu können. Hierzu werden in der vorliegenden Arbeit Grenz- und Zielwerte für die 24 Standardnutzungen berechnet. Angegeben werden für die Kühlkälte die spezifische elektrische Leistung, die Vollbetriebszeit und der spezifische Strombedarf. Ergänzt werden diese Werte um Angaben zum Strombedarf für die Entfeuchtung und die Befeuchtung.

2 Einführung zum Modul Klimakälte

2.1 Ausgangslage

Um den erforderlichen Komfort für die Mitarbeiter zu sichern, kann in bestimmten Nutzungszonen eines Gebäudes eine Klimatisierung erforderlich sein. Die Quantifizierung des Strombedarfs zur Klimatisierung war bisher nur mit aufwendigen dynamischen Simulationsrechnungen möglich. Aufgrund des zusätzlichen Kosten- und Zeitaufwandes wurden damit in der Regel nur kritische Räume in extremen Hitzeperioden untersucht. Eine Bilanzierung des gesamten Gebäudes erfolgte in den meisten Fällen nicht. Eine Einschätzung des Strombedarfs zur Klimatisierung war in der Planungsphase damit in der Regel nicht gegeben.

In dem Modul 2.3 Klimakälte wird ein einfaches Verfahren zur Abschätzung des Strombedarfs zur Klimatisierung entwickelt. Damit wird ein Hilfsmittel für die Beurteilung und Optimierung des Strombedarfs Klima gegeben.

2.2 Anwendungsbereich

Die Anwendung des Kurzverfahrens erstreckt sich auf Komfortklimaanlagen in Deutschland. Berechnet wird der Aufwand für Kühlkälte, Entfeuchungskälte und die Befeuchtung. Insbesondere die Berechnungsansätze zur Modellierung des Entfeuchtungs- und Befeuchtungsprozesses sollten bei Bedarf in zukünftigen Arbeiten verfeinert werden.

Der Energiebedarf für die Heizung und Warmwasserbereitung wird nicht erfasst, da in dem vorliegenden Projekt nur der Strombedarf des Gebäudes analysiert wird.

Mit dem hier vorgestellten Verfahren wird der Einfluss der einzelnen Gebäude- und Anlagenparameter auf den Strombedarf richtig wiedergegeben. Es können somit prinzipielle Entscheidungen auf der Konzeptebene getroffen werden. Die Berechnungen ersetzen jedoch keine Gebäude- und Anlagensimulation.

2.3 Zielsetzung

Die Ziele des Moduls Klimakälte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Definition einer Methodik zur Berechnung des Elektrizitätsbedarfs für die Kühlkälte, die Entfeuchungskälte und die Befeuchtung.
- Einfaches Planungshilfsmittel für die Optimierung und den Nachweis des energetischen Niveaus bei Neubauten und für die Analyse und Optimierung des Elektrizitätsbedarfs in bestehenden Gebäuden.
- EXCEL-Werkzeug zur Berechnung und für den Nachweis des Strombedarfs Klima mit Grenz- und Zielwerten.

2.4 Begriffe

Die verwendeten Begriffe sind jeweils im Text erläutert. Zum besseren Verständnis der Gleichungen sind im Anhang die verwendeten Formelzeichen tabellarisch zusammengestellt.

3 Methodik

Der Berechnungsgang zur Ermittlung des Strombedarfs zur Klimatisierung kann in zwei große Blöcke untergliedert werden, die nacheinander abgearbeitet werden:

3. Zone/Raum: Berechnung des Raumbedarfs zum Einhalten der Komfortanforderungen (Temperatur, Feuchte)
4. Anlage: Stromaufwand der Anlage, um den Raumbedarf zu decken

Zunächst wird also der Raumbedarf berechnet, der sich aus der jeweiligen Nutzung, dem gewünschten Komfort, dem Baukörper und dem Klima ergibt. Verschiedentlich wird im Folgenden vereinfachend die Bezeichnung „Raum..“ statt „Zonen...“ verwendet. Selbstverständlich kann ein Raumbedarf sich über eine Gruppe von Räumen erstrecken, d. h. es ist nicht notwendigerweise ein einzelner Raum gemeint.

Ist der Raumbedarf bekannt, wird in einem zweiten Schritt der Strombedarf berechnet, der zur Abfuhr des Raumbedarfs durch die RLT-Anlage aufgewendet werden muss.

Abbildung 3-1 verdeutlicht die Bilanzgrenze zwischen diesen beiden Teilen (weiß = Raumbedarf, grau = Anlage) für den Fall der Kühlkälte.

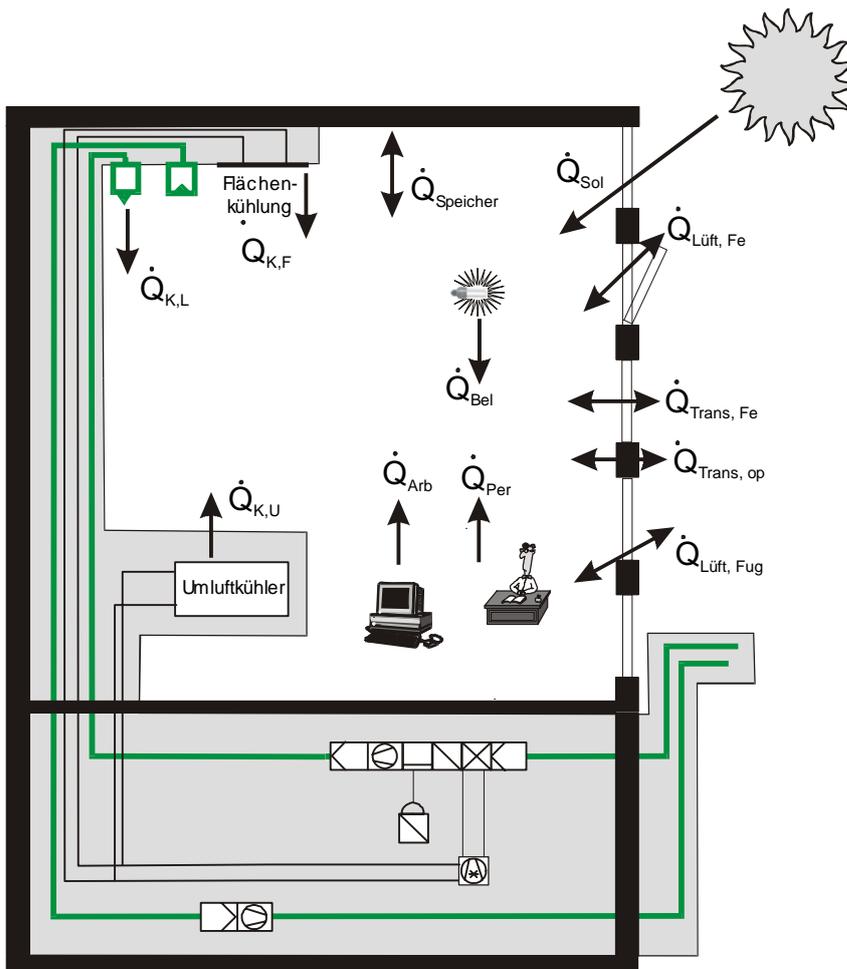


Abbildung 3-1: Bilanzgrenze zwischen Raum (weiß) und Anlagen (grau)

Im Weiteren wird die Berechnung des Strombedarfs beschrieben, wobei Raumbedarf und Anlagentechnik getrennt behandelt werden. In den Abschnitten 3.1 und 3.2 wird zunächst das prinzipielle Vorgehen erläutert. In dem Abschnitt 4 wird dann die mathematische Beschreibung der Berechnungsgrößen dokumentiert.

3.1 Raumbedarf

In Modul 1.3 werden im Rahmen einer Parameterstudie unterschiedliche Kurzverfahren zur Berechnung des Jahres(kühl)kältebedarfs und der maximalen Kältelast getestet. Wegen der hohen Rechengenauigkeit und der guten Einbindung der Anlagentechnik wird auf der Grundlage der Parameterstudie das Monatsbilanzverfahren [Elsberger 2000] zur Berechnung des Raumbedarfs ausgewählt. Neben dem Jahreskältebedarf und der maximalen Kältelast erlaubt dieses Verfahren auch die Berechnung des Entfeuchtungs- und Befeuchtungsbedarfs.

An dieser Stelle soll noch einmal hervorgehoben werden, dass sich die Berechnungen in der Parameterstudie (Modul 1.3) und die Berechnungen hier (Modul 2.3: Klimakälte) bei der Behandlung des Außenluftwechsels unterscheiden. So wird in der Parameterstudie (Modul 1.3) vereinfacht ein konstanter Außenluftwechsel angesetzt, der dem Raum auf Außentemperaturniveau zugeführt wurde. Bei den hier durchgeführten Berechnungen der Raumlasten wird davon ausgegangen, dass der Luftvolumenstrom mit Raumtemperatur eingeblasen wird, also keine thermischen Auswirkungen auf den Raum hat (vereinfacht kann man auch von einem Luftvolumenstrom von Null ausgehen). Damit werden so genannte Raumlasten berechnet, was in der Namensgebung durch den Zusatz „Raum“ verdeutlicht wird.

	Modul 1.3: Parameterstudie Kälte	Modul 2.3: Klimakälte (hier)
Luftwechsel	Konstanter Außenluftvolumenstrom; mit Außentemperatur zugeführt	Außenluftvolumenstrom mit Raumtemperatur zugeführt (entspricht: Luftwechsel von Null)
Namensgebung		
Energie pro Jahr	Jahreskältebedarf; Q_{KB}	Jahres raum kältebedarf; Q_{RK}
Maximale Leistung	Maximale Kältelast	Maximale Raum kühl last

Tabelle 3-1: Zusammenhang in der Namensgebung zwischen der Parameterstudie in Modul 1.3 und der hier durchgeführten Berechnung des Strombedarfs (Modul 2.3: Klimakälte)

3.2 Anlage

Aus den Raumlasten muss der Stromverbrauch zur Klimatisierung berechnet werden. Dabei wird zwischen folgenden Teilverbräuchen unterschieden:

- Kühlung
- Entfeuchtung
- Befeuchtung

Das prinzipielle Vorgehen bei der Berechnung des Strombedarfs ist in dem folgenden Diagramm beispielhaft für den Kühlfall dargestellt. Zunächst werden auf Raum- bzw. Zonenebene die vorhandenen Kühlsysteme (Raumsystem) definiert und der Beitrag der freien Kühlung ermittelt. Dann werden die Zonendaten bezogen auf die Kälteanlagen zusammengefasst und auf dieser Ebene, unter Berücksichtigung der Hilfsenergie, der Strombedarf ermittelt.



Abbildung 3-2: Schematische Darstellung des Berechnungsgangs zur Ermittlung des Strombedarfs für die aktive Kühlung

Das Schema wird im Folgenden näher erläutert. Es wird jeweils angegeben, welche prinzipiellen Abhängigkeiten bei der Berechnung berücksichtigt werden. Diese sind in der Regel Eingabegrößen, über die der Benutzer das System definiert. Die mathematische Beschreibung wird in Abschnitt 4.2 dargestellt.

Raumsystem

Zunächst wird das Kühlsystem definiert, mit dem die Kälte in den Raum eingebracht wird. Abgebildet werden kann

- eine Luftkühlung (maximale Zulufttemperaturdifferenz, Grundluftwechsel, erhöhter Luftwechsel)
- ein Kühldeckensystem
- thermisch aktivierte Bauteilsysteme (im Folgenden als TAB abgekürzt)
- und eine Umluftkühlung.

Es können zwei getrennte Kühlsysteme je Raum definiert werden. In dem Fall muss angegeben werden, welches System als Grundlast- und als Spitzenlastsystem arbeitet.

Freie Kühlung

Ein Teil des Raumkältebedarfs kann durch freie Kühlung gedeckt werden. Freie Kühlung bedeutet dabei nach DIN 1946 Teil 1 die Kühlung mittels Außenluft, die unterhalb der Raumtemperatur liegt. Freie Kühlung kann entweder direkt durch Einblasen von kälterer Außenluft in den Raum erfolgen (Luftsystem) oder indirekt, indem eine Kälteflüssigkeit

über einen Wärmetauscher durch die Außenlufttemperatur abgekühlt wird. Diese Kälteflüssigkeit wird dem Raum zugeführt und kann z. B. über ein Flächenkühlsystem Kühllast aus dem Raum abführen.

Mit dem hygienisch erforderlichen Grundvolumenstrom (Außenluft) kann bereits ein Teil des Raumkältebedarfs abgeführt werden (Raumkältebedarf wird mit Außenluftvolumenstrom von Null berechnet). Da es sich auch um Einblasen kühler Außenluft handelt, wird dies bereits als freie Kühlung bezeichnet.

Bei der Ermittlung des durch freie Kühlung gedeckten Anteils des Raumkältebedarfs werden folgende Punkte berücksichtigt:

- Raumsystem (Luftkühlung, Kühldecke, TAB, Umluftkühler)
- Art der Wärmeabgabe an die Umgebung (bei indirekter freier Kühlung)
 - Luftkühlung
 - Verdunstungskühlung
 - Wasserkühlung
- Nutzbarkeit des Kühlturms (Rückkühlwerks)

Freie Kühlung kann über die Lüftungsanlage und das Wassersystem erfolgen.

Kälteanlage

Der Übergang auf die Kälteanlagenbetrachtung wird erreicht, indem auf Zonenebene dem Grund- und dem Spitzenlastsystem jeweils eine Kälteanlage zugeordnet wird. Ist in einem Gebäude beispielsweise nur eine Kälteanlage vorhanden, wird immer diese eine Anlage zugeordnet. Bei mehreren Kälteanlagen muss eine entsprechende Zuordnung erfolgen.

Die Betriebsweise der Kältemaschine wird über die Jahresarbeitszahl beschrieben.

Hilfsenergie

Der Strombedarf für Umwälzpumpen, Regelung und Ventilatoren wird mit einem pauschalen Betrag berücksichtigt. Gesondert quantifiziert wird der Umwälzpumpenstrom für

- Flächenkühlsysteme und
- Umluftkühler.

Der Ventilatorstrombedarf für den Transport von Zu- und Abluft wird nicht als Hilfsenergie angesehen, sondern wird in einem gesonderten Modul „Luftförderung“ behandelt.

4 Berechnung

Im Folgenden werden die Ansätze beschrieben, mit denen das physikalische Modell abgebildet und quantifiziert wird.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden folgende Vereinfachungen getroffen:

- Bei der zonenbezogenen Berechnung werden die Indizes für die Zone, den Monat und den Bereich bei den Formelzeichen nicht mit aufgeführt.
- Sofern nicht anders erwähnt, handelt es sich bei den Energiewerten, Temperaturen und Volumenströmen um Monatsmittelwerte, in der Regel über die tägliche Betriebszeit. Dies wird nicht jedes Mal gesondert erwähnt.
- Die angegebenen Beispiele beziehen sich auf die aktive Kühlung der Raumluft. Be- und Entfeuchtung werden jeweils gesondert betrachtet.

4.1 Raumlasten

4.1.1 Jahresraumkältebedarf

Das Verfahren zur Ermittlung des Jahresraumkältebedarfs ist in Modul 1.3 prinzipiell skizziert und in [Elsberger 2001] und [Rouvel 1997] ausführlich beschrieben.

Für die weitere Berechnung wird der Kältebedarf entsprechend der Modul1.3/Gl. 1-12 verwendet. Der Raumkältebedarf jeder Zone wird berechnet für

- die 12 Monaten des Jahres
- und die Bereiche Ia1, Ia2, Ib und II.

Abweichend zu [Elsberger 2001] wird der Bereich Ia noch einmal unterteilt in die Bereiche Ia1 und Ia2. Bereichsgrenze ist die Raumsolltemperatur, vermindert um die Temperaturerhöhung, die die Außenluft auf dem Weg in die Zone erfährt (Ventilator und Wärmeaufnahme in den Kanälen). Über diese weitere Differenzierung wird sichergestellt, dass durch eine Erhöhung des Außenluftvolumenstroms die Kälteanforderung nicht auf Null reduziert werden kann. Im Gegenteil führt im Bereich Ia1 eine Erhöhung des Volumenstroms zu einer Erhöhung der Kälteanforderung.

Die maximale Raumkühlleistung wird nach Modul1.3/Gl. 1-15 berechnet.

In der Bilanz wird u. a. zur Berechnung der Verluste die Raumtemperatur T_R verwendet. Bei dieser Temperatur handelt es sich um die mittlere Temperatur bei Kühlzuständen. Diese unterscheidet sich von der maximalen Raumtemperatur aufgrund

- der Hysterese der Regelung
- der Tatsache, dass in vielen Fällen in einem Temperaturbereich gekühlt wird und nicht auf einen Sollwert
- eine gleitende Raumtemperatur entsprechend der DIN 1946 Teil 2 realisiert wird.

Für die Berechnung wird angenommen, dass die mittlere Raumtemperatur um 2 Kelvin unter der maximalen Raumtemperatur liegt.

$$Gl. 4-1 \quad T_R = T_{R,max} - 2 \text{ Kelvin}$$

mit

T_R mittlere Raumtemperatur

$T_{R,max}$ maximale Raumtemperatur

4.1.2 Befeuchtungsbedarf / Entfeuchtungsbedarf

Der Be- und Entfeuchtungsbedarf zum Einhalten definierter Sollwerte für die minimale und maximale Raumluftheuchte wird ebenfalls nach [Elsberger 2000] abgeschätzt. Da die Verdampfungsenthalpie von Wasser sehr viel größer ist als die Wärmekapazität der feuchten Luft, wird die Temperaturänderung der feuchten Luft bei der Berechnung vernachlässigt. Der Be- bzw. Entfeuchtungsbedarf ergibt sich damit über folgende Gleichung:

$$Gl. 4-2 \quad Q_{Be-/Entfeuchtung} \approx r_0 |x_{Außenluft} - x_{Zuluft}| \cdot m_{Zuluft}$$

mit

r_0 spezifische Verdampfungswärme von Wasser in kJ/kg

$x_{Außenluft}$ absolute Feuchte der Außenluft in g/kg

x_{Zuluft} absolute Feuchte der Zuluft in g/kg

m_{Zuluft} Masse der zugeführten Zuluft in dem betrachteten Zeitraum in kg

Die Masse der zugeführten Zuluft berechnet sich nach folgendem Zusammenhang

$$Gl. 4-3 \quad m_{Zuluft} = \dot{V}_{Zu} \rho_L t_{BE}$$

mit

\dot{V}_{Zu} Zuluftvolumenstrom im betrachteten Zeitraum in m³/h

t_{BE} Be- bzw. Entfeuchtungsstunden innerhalb des betrachteten Monats

ρ_L Dichte der Luft bei Umgebungsdruck und 20°C in kg/m³.

Da eine Befeuchtung der Raumluft in der Regel überwiegend im Winter erforderlich ist, wird für die Berechnung der Befeuchtungslast der hygienisch erforderliche Grundvolumenstrom angesetzt.

Für die in der Regel an heißen, schwülen Tagen erforderliche Entfeuchtung wird der maximale Luftvolumenstrom angesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass hier aus Zwecken der freien oder aktiven Kühlung der Luftwechsel auf den maximalen Wert angehoben ist.

Die erforderliche absolute Feuchte der Zuluft ergibt sich aus einer stationären Feuchtebilanz zu

$$Gl. 4-4 \quad x_{Zuluft} = x_{Raum} - \frac{m_{Feuchte}}{m_{Zuluft}}$$

mit

$m_{Feuchte}$ im Raum freigesetzte Feuchte durch Personen und sonstige Feuchtequellen in kg

x_{Raum} Sollwerte der absoluten Feuchte in g/kg

Unter Verwendung von Mittelwert und Standardabweichung der Außenfeuchte $x_{Außenluft}$ kann der Raumbedarf für Be- und Entfeuchtung für jeden Monat ermittelt werden.

4.2 Anlagentechnik

Die rechnerische Umsetzung des in Abbildung 3-2 dargestellten Konzeptes wird in Abbildung 4-1 und Abbildung 4-4 weiter ausgeführt. Der Berechnungsgang wird im Folgenden erläutert, wobei immer Bezug auf diese Grafiken genommen wird.

4.2.1 Zonenweise Betrachtung

Für jede Zone wird aus dem Raumkältebedarf die Kälteanforderung an die Kältemaschinen berechnet. Der Berechnungsgang ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

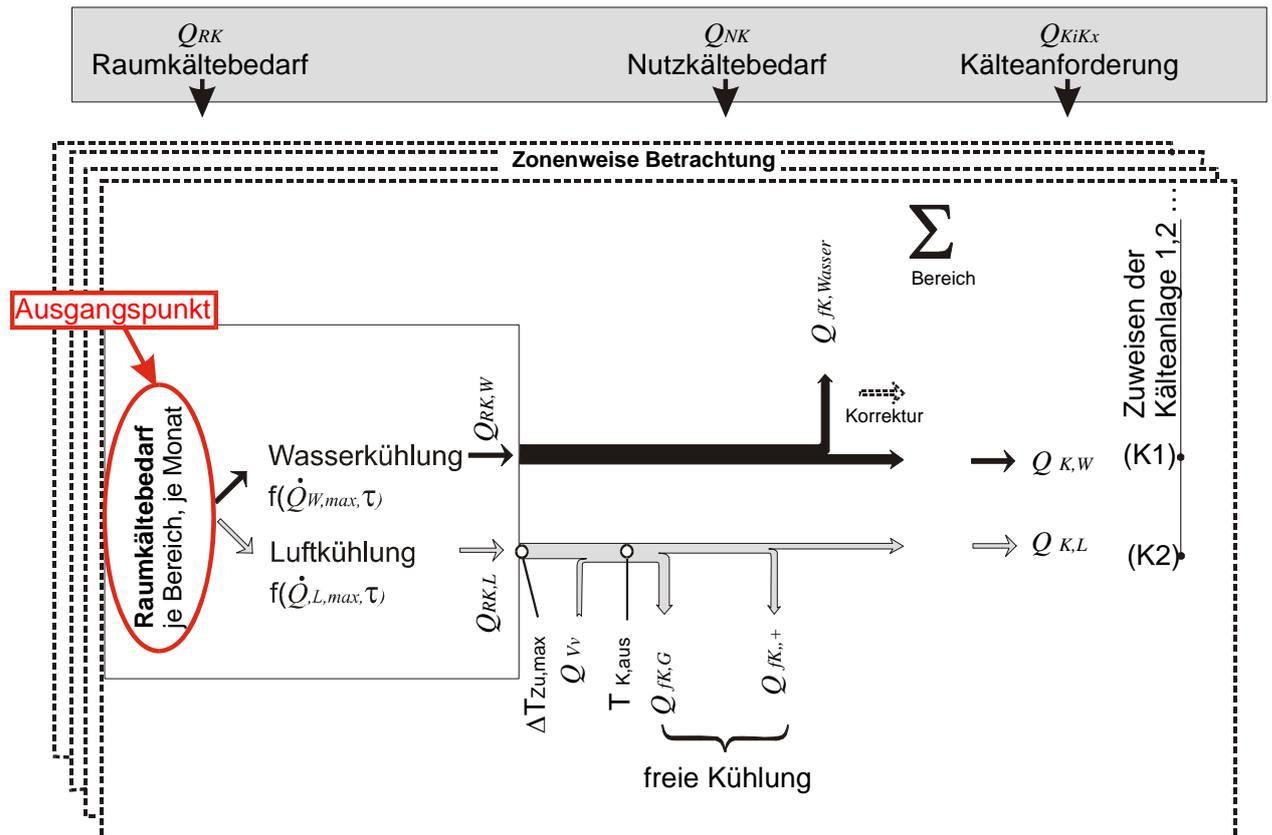


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des Rechenweges zur Ermittlung des Jahresstrombedarf Kühlkälte

Ausgangspunkt der Berechnung ist der Raumkältebedarf, der mit dem Kurzverfahren für die vier Bereiche (Ia1, Ia2, Ib und II) für jeden Monat ermittelt wurde (siehe Abschnitt 4.1.1).

Dieser muss durch die im Raum vorhandenen Kühlsysteme (Raumsysteme: Grund- und Spitzenlastsystem) abgeführt werden.

Werden zwei Raumsysteme definiert, muss immer ein Luft- und ein Wassersystem kombiniert werden. Die Definition von zwei Luft- oder zwei Wassersystemen ist nicht möglich. Diese müssen gegebenenfalls zu einem System zusammengefasst werden.

4.2.1.1 Aufteilung auf Grund- und Spitzenlastsystem

Die Aufteilung zwischen Grund- und Spitzenlastsystem wird nach [Elsberger 2000] vorgenommen. Dabei wird berücksichtigt, dass die Amplitude, mit der die erforderliche Kälteleistung um den Mittelwert schwankt, von der Zeitkonstante des Gebäudes abhängt und damit bei leichten Gebäuden das Spitzenlastsystem häufiger mit eingreifen muss als in schweren Gebäuden. Zudem wird die maximale Leistung des Grundlastsystems berücksichtigt.

Damit kann berechnet werden, welcher Kühllastanteil von dem Luft- und welcher von dem Wassersystem abgeführt werden muss. Für die weitere Berechnung wird zwischen dem Luft- und dem Wassersystem unterschieden.

4.2.1.2 Luftsystem

Zulufttemperaturdifferenz $\Delta T_{Zu,max}$

Abhängig von den Zuluftventilen und dem Anlagenkonzept wird eine maximale Zulufttemperaturdifferenz definiert, bis zu der eine zugfreie Einbringung der Zuluft in den Raum möglich ist.

Als Standardvorgaben sind folgende Werte vorgesehen:

	$\Delta T_{Zu,max}$
Drallauslass	8 Kelvin
Weitwurfdüse	8 Kelvin
Schlitzauslass	6 Kelvin
Lüftungsgitter	4 Kelvin
Quelllüftung	3 Kelvin
Induktionsanlage (Primärluft)*	11 Kelvin
*) Bei Induktionsanlagen wird Primärluft als Luftsystem und Sekundärluft (mit Wärmetauscher) als Umluftkühlsystem abgebildet.	

Verteilverluste Q_{Vv}

Auf dem Weg von der Klimazentrale zum Deckenauslass nimmt die Luft einen Wärmestrom aus der Umgebung auf. Hierdurch steigt die Zulufttemperatur an. Gleichzeitig erfährt die Zuluft im Ventilator eine Temperaturerhöhung. In Bezug auf den Kältebedarf stellen diese Wärmeströme einen Verlust dar. Sie werden zu den so genannten Verteilverlusten zusammengefasst.

$$Gl. 4-5 \quad Q_{Vv} = \dot{V}_{Zu} t_{RK} c (\Delta T_{Kanal} + \Delta T_{Vent}) = \dot{V}_{Zu} t_{RK} c \Delta T_V$$

mit

Q_{Vv} Verteilverluste in kWh

t_{RK} Anzahl der Stunden, in denen ein Raumkältebedarf besteht

ΔT_{Kanal} Zulufttemperaturerhöhung im Kanalnetz in Kelvin

ΔT_{Vent} Zulufttemperaturerhöhung im Ventilator in Kelvin

ΔT_V Zulufttemperaturerhöhung im Kanalnetz und Ventilator in Kelvin

Für die weitere Betrachtung wird die Temperaturerhöhung pauschal wie folgt angesetzt:

$$\Delta T_V = 1,5 \text{ Kelvin}$$

Austrittstemperatur Kältezentrale $T_{K,aus}$

Die erforderliche Austrittstemperatur der Zuluft aus der Kältezentrale $T_{K,aus}$ ergibt sich über folgenden Zusammenhang,

$$Gl. 4-6 \quad T_{K,aus} = T_R - \Delta T_{Zu,max} - \Delta T_V$$

Freie Kühlung mit dem Luftsystem $Q_{fK,L}$

Die Austrittstemperatur aus der Kältezentrale muss nicht notwendigerweise durch die Kälteanlage realisiert werden. Im Gegenteil liegt die Außentemperatur in vielen Fällen unter $T_{K,aus}$, so dass diese Temperatur ohne zusätzlichen Energieaufwand zur aktiven Kühlung erreicht werden kann. Das Einbringen kühler Außenluft, um die Raumkühllast abzuführen, nennt man freie Kühlung.

Die freie Kühlung über die Lüftungsanlage wird zonenbezogen behandelt. Dieses Betriebsverhalten kann in der Realität erreicht werden, wenn für jede Zone ein eigener Volumenstromregler, ein eigenes Heiz- und ein eigenes Kühlregister vorhanden sind. Ist dies nicht gegeben, wird die Zulufttemperatur in der Regel nach dem Raum mit dem höchsten Kältebedarf geregelt. Die anderen Räume werden dann Raumlufttemperaturen unter dem Sollwert aufweisen. Diese Rückkopplung zwischen Anlage und Raum wird aber in dem vorliegenden Kurzverfahren nicht berücksichtigt, so dass eine zonenweise Betrachtung vorgenommen werden kann.

$$Gl. 4-7 \quad Q_{fK,L} = c \int_t \dot{V}_{Zu}(t) (T_R(t) - \max[T_A(t); T_{K,aus}]) dt$$

Welcher Anteil des Raumkältebedarfs durch freie Kühlung abgeführt werden kann, hängt neben der Zulufttemperaturdifferenz ΔT_{Zu} von dem Zuluftvolumenstrom ab. Häufig besteht die Möglichkeit den Grundvolumenstrom für die freie Kühlung zu erhöhen. Der gesamte für die freie Kühlung verfügbare Volumenstrom setzt sich damit zusammen aus:

$$Gl. 4-8 \quad \dot{V}_{Zu} = \dot{V}_G + \dot{V}_+$$

mit

\dot{V}_G Grundvolumenstrom in m³/h (ergibt sich in der Regel aus dem hygienisch erforderlicher Mindestvolumenstrom)

\dot{V}_+ über den Grundvolumenstrom hinaus erhöhter Zuluftvolumenstrom in m³/h

Als Raumtemperatur $T_R(t)$ wird die maximale Raumsolltemperatur $T_{R,Soll}$ angesetzt, da nur in diesem Fall ein Kältebedarf im Raum auftritt.

Die Zeitabhängigkeit der Außentemperatur wird durch die monatsweise Betrachtung und die Unterscheidung in vier Bereiche (Ia1, Ia2, Ib, II) berücksichtigt.

Entsprechend setzt sich der Beitrag der freien Kühlung aus einem Grundbetrag und einem erhöhten Betrag zusammen.

$$Gl. 4-9 \quad Q_{fK,L} = Q_{fK,G} + Q_{fK,+}$$

Die Kälteanforderung des Luftsystems an die Kälteanlage $Q_{K,L}$ ergibt sich damit aus dem Raumkältebedarf, erhöht um die Verteilverluste und vermindert um den Beitrag der freien Kühlung

$$Gl. 4-10 \quad Q_{K,L} = Q_{RK,L} + Q_{Vv} - Q_{fK,L}$$

Anmerkung:

Da der Grundvolumenstrom in der Regel hygienisch bedingt ist, und deswegen in jedem Fall auftritt, wird $Q_{fK,G}$ immer als erstes vom Raumkältebedarf abgezogen. Dies geschieht auch, wenn die Zuluft nicht aktiv gekühlt wird oder das Luftsystem als Spitzenlastsystem definiert ist.

Nachtlüftung

In Hitzeperioden kann das Gebäude außerhalb der Nutzungszeit mit kalter Nachtluft gespült werden. Hierdurch werden die thermisch aktiven Speichermassen entladen und können so am nächsten Tag eine größere Wärmemenge einspeichern. Dies reduziert die Kälteanforderung an die Kältemaschine.

Da die Ein- und Ausspeichervorgänge dynamisch sind, ist eine genaue Quantifizierung der Nachtlüftung nur über dynamische Simulationsrechnungen möglich. In dem hier beschriebenen Kurzverfahren wird ein vereinfachter Ansatz verwendet. Der nachts auftretende Luftvolumenstrom wird korrigiert und als zusätzlicher Luftvolumenstrom während der Nutzungszeit gewertet. Der Korrekturfaktor berücksichtigt die dynamischen Effekte. So muss im Falle der Nachtlüftung die während der Nutzungszeit im Raum anfallende Wärme zunächst in die Speichermassen eingespeichert und dann während den Nachtstunden wieder ausgespeichert werden. Mit einem Kubikmeter Luft kann deswegen in der Nacht nicht die gleiche Wärmemenge aus der Zone abgeführt werden wie tagsüber. Für die Korrektur wird ein in [Rouvel 1997] aufgeführter Ansatz verwendet, der jedoch modifiziert wird. So wird die Korrektur nur auf den Nachtluftwechsel angewendet und nicht auf den über den Tag

gemittelten Gesamtluftwechsel. Weiter wird ein Wert für den Nachtluftwechsel definiert, ab dem eine weitere Erhöhung keine Auswirkungen mehr auf den korrigierten Luftwechsel hat. Der korrigierte Luftwechsel bleibt ab diesem Luftwechsel konstant. Dies verhindert ein Absinken des korrigierten Luftwechsels bei hohen Werten des Nachtluftwechsels, wie es bei dem Ansatz aus [Rouvel 1997] auftritt.

Bei der Ermittlung der Korrekturfaktoren wird zwischen leichter, mittlerer und schwerer Bauweise unterschieden. Bewertungsgröße ist die spezifische Speicherkapazität, wobei die Grenzen der VDI 2078 herangezogen werden:

Leicht:	unter $100 \text{ Wh}/(\text{K m}^2_{\text{FB}})$	
Mittel	$100 \text{ Wh}/(\text{K m}^2_{\text{FB}})$	bis $200 \text{ Wh}/(\text{K m}^2_{\text{FB}})$
Schwer	über $200 \text{ Wh}/(\text{K m}^2_{\text{FB}})$	

Die sich berechnenden korrigierten Nachtluftwechsel sind in Abbildung 4-2 in Abhängigkeit vom tatsächlichen Nachtluftwechsel dargestellt.

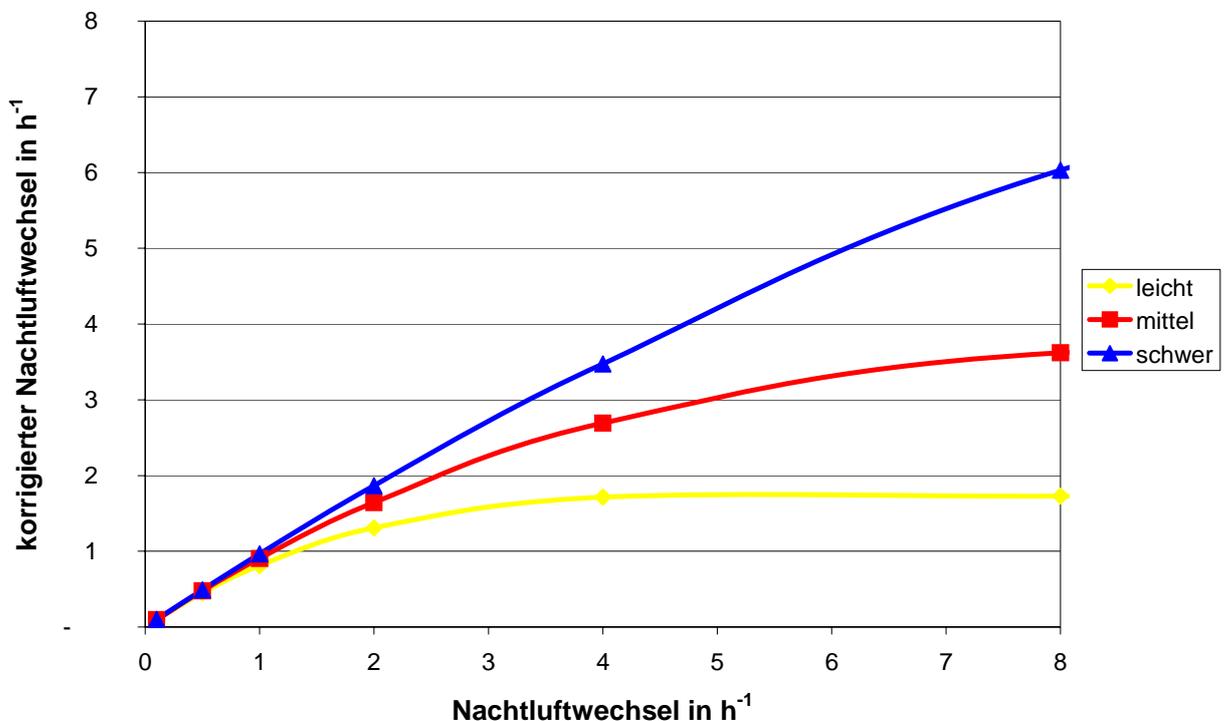


Abbildung 4-2: In der Berechnung berücksichtigter korrigierter Nachtluftwechsel

Als Außenlufttemperatur für die Nachtlüftung wird die mittlere Außenlufttemperatur des Bereiches angesetzt, vermindert um die Standardabweichung des jeweiligen Monats.

$$\text{Gl. 4-11} \quad T_{A,N,B,M} = T_{A,B,M} - \sigma_{T,M}$$

mit

$T_{A,N,B,M}$ Außenlufttemperatur für die Nachtlüftung im Bereich B im Monat M in °C

$T_{A,B,M}$ Außenlufttemperatur im Bereich B im Monat M in °C

$\sigma_{T,M}$ Standardabweichung der Außenlufttemperatur im Monat M

Das kleinste Berechnungszeitintervall in der Energiebilanz ist der Bereich je Monat. Auf dieser Ebene muss der Zeitraum für die Nachtlüftung definiert werden. Es wird angenommen, dass Nachtlüftung nur in den Bereichen Ia1 und Ia2 vorgenommen wird (siehe Abschnitt 4.1.1). In diesen Bereichen sind die mittleren Außenlufttemperaturen schon vergleichsweise hoch, so dass mit der freien Kühlung während der Nutzungszeit nur noch eine begrenzte Kältelast abgeführt werden kann. Zudem besteht nicht die Gefahr, dass durch die Nachtlüftung ein Heizwärmebedarf erzeugt wird, wie dies in den Bereichen II und Ib der Fall wäre.

Der Zeitraum für die Nachtlüftung t_N in den Bereichen Ia1 und Ia2 des Monats M berechnet sich damit zu

$$\text{Gl. 4-12} \quad t_{N,B,M} = h_{B,M} \cdot \psi$$

mit

$t_{N,B,M}$ Zeitraum für Nachtlüftung für den Bereich B des Monats M in Stunden

Der Faktor ψ gibt dabei die Intensität der Nachtlüftung an. Es wird unterschieden zwischen Nachtlüftung gering $\psi = 0,5$

Nachtlüftung mittel $\psi = 1$

Nachtlüftung stark $\psi = 2$

Um die Plausibilität dieses Ansatzes zu überprüfen, ist ein Vergleich mit entsprechenden dynamischen Simulationsrechnungen wünschenswert. Auf dieser Grundlage können die Korrekturfaktoren (siehe Abbildung 4-2) und die Intensitätsfaktoren ψ noch weiter verfeinert werden.

4.2.1.3 Wassersystem

Unter Wassersystemen werden Kühldecken, thermisch aktivierte Bauteilsysteme, aber auch Umluftkühler verstanden. Für jedes Wassersystem muss die maximale Raumkühlleistung $\dot{Q}_{W,max}$ angegeben werden, die in der Zone zur Verfügung steht.

Leitungsverluste werden beim Wassersystem vernachlässigt.

4.2.1.3.1 Freie Kühlung mit dem Wassersystem $Q_{fK,W}$

Auch über das Wassersystem kann kühlere Außenluft oder eine andere Wärmesenke (Wasser, Erdreich) für die freie Kühlung genutzt werden. Der Anteil der freien Kühlung wird zunächst zonenbezogen berechnet. Da der Kühlturm nur entweder von der Kälteanlage oder zur freien Kühlung genutzt werden kann, wird dann in deinem zweiten Schritt auf Anlagenebene überprüft, ob freie Kühlung überhaupt möglich ist, oder ob der Kühlturm von der Kälteanlage benötigt wird. Der Beitrag der freien Kühlung wird in dem Fall entsprechend modifiziert.

Bei der Realisierung von freier Kühlung mit dem Wassersystem wird eine Kälteträgerflüssigkeit abgekühlt und in den Raum transportiert, um dort einen Wärmestrom aufzunehmen. Damit dieser Vorgang ablaufen kann, müssen Temperaturdifferenzen für die Wärmeübertragung vorhanden sein.

Raumtemperatur \longrightarrow Kälteträgerflüssigkeit \longrightarrow Umgebungstemperatur

Die zur Wärmeübertragung erforderlichen Temperaturdifferenzen und die Spreizungen sind abhängig von Aggregatzuständen der Medien, zwischen denen ein Wärmestrom auftritt. Zudem werden insbesondere bei Flächenkühlsystemen häufig zusätzliche Systemtrennungen vorgenommen (1. Kreis: Flächensystem im Raum; 2. Kreis: Kälteflüssigkeit; 3. Kreis: Frostschutzkreis für Kühlturm). Unter Berücksichtigung dieser Aspekte lässt sich eine Umgebungstemperatur berechnen $T_{U,fK}$, die für die freie Kühlung (100% Leistung der im Raum installierten Leistung) erforderlich ist.

$$\text{Gl. 4-13} \quad T_{U,fK} = T_{Z,Ein} - \Delta T_{fK}.$$

mit

$T_{Z,Ein}$ Eintrittstemperatur des Kälteflüssigkeitsmediums in die Zone

ΔT_{fK} erforderliche Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf- und Außenlufttemperatur.

Eintrittstemperatur in Zone $T_{Z,Ein}$

Luftkühlung: Zulufttemperatur berechnet sich zu

$$\text{Gl. 4-14} \quad T_{Z,Ein} = T_{Zu} = T_{R,Soll} - \Delta T_{Zu,max}$$

Kühldecke: als Eintrittstemperatur des Kaltwassers wird ein üblicher Wert angenommen von:

$$T_{Z,Ein} = 17^{\circ}\text{C}$$

Thermisch aktivierte Bauteilkühlung:

$$T_{Z,Ein} = 20^{\circ}\text{C}$$

Umluftkühler: $T_{Z,Ein} = 16^{\circ}\text{C}$

Temperaturdifferenz ΔT_{fK}

Um die Temperaturdifferenz ΔT_{fK} zu bestimmen wird auf Angaben aus [Recknagel 01/02] zurückgegriffen. Es werden Mittelwerte für die Spreizung ($\Delta T_{Ein-Aus}$) und die Temperaturdifferenz zur Wärmeübertragung (ΔT_{wv}) angegeben. Unterschieden wird zwischen den beiden Wärmeträgermedien Luft/Gas und Flüssigkeit (Wasser; Kältemittel, Sole ...).

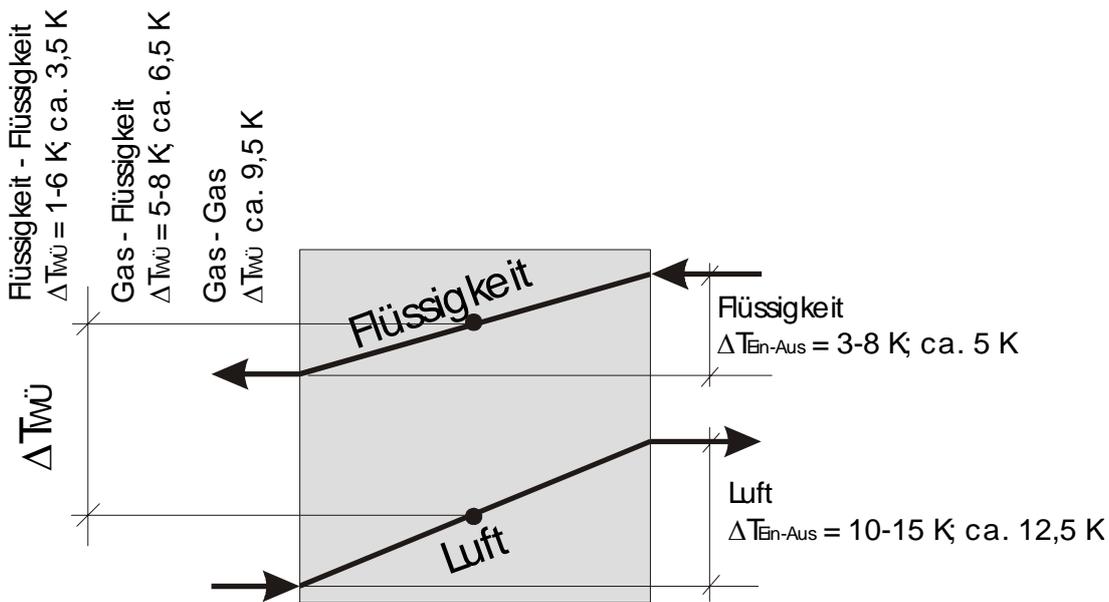


Abbildung 4-3: Temperaturdifferenzen bei der Wärmeübertragung im Verdampfer oder Kondensator

Temperaturspreizung $T_{Ein-Aus}$

Die Temperaturspreizung zwischen Ein- und Austrittstemperatur liegt nach [Recknagel 01/02] bei

- Gl. 4-15 Gas: 10 bis 15 Kelvin; Mittelwert $\Delta T_{Ein-Aus} = 10 \text{ Kelvin}$
- Gl. 4-16 Flüssigkeit: 3 bis 8 Kelvin; Mittelwert $\Delta T_{Ein-Aus} = 3 \text{ Kelvin}$

Treibende Temperaturdifferenz zur Wärmeübertragung $\Delta T_{WÜ}$

Für die Wärmeübertragung zwischen zwei Stoffströmen ist eine treibende Temperaturdifferenz (hier betrachtet zwischen den Mitteltemperaturen) erforderlich.

- Gl. 4-17 Flüssigkeit-Flüssigkeit 1 bis 6 Kelvin; Mittelwert $\Delta T_{WÜ} = 2,5 \text{ Kelvin}$
- Gl. 4-18 Gas-Flüssigkeit 5 bis 8 Kelvin; Mittelwert $\Delta T_{WÜ} = 5,5 \text{ Kelvin}$
- Gl. 4-19 Gas-Gas Mittelwert $\Delta T_{WÜ} = 9,5 \text{ Kelvin}$

Um die für die freie Kühlung erforderliche Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf- und Umgebungstemperatur zu ermitteln müssen die jeweiligen Temperaturdifferenzen und Spreizungen angesetzt werden:

$$Gl. 4-20 \quad \Delta T_{fK} = \frac{1}{2} \Delta T_{Ein-Aus} (Umgebung) + dT_{WÜ,Umgebung} + n \Delta T_{WÜ,Fl-Fl} - \frac{1}{2} \Delta T_{Ein-Aus} (Raum)$$

mit

n Anzahl der Systemtrennungen

Für die Berechnungen wird als Standardannahme davon ausgegangen, dass mit Außenluft gekühlt wird und eine Flüssigkeit als Kälteübertragungsmedium eingesetzt wird. Im Fall der

Kühldecke oder der TABs wird von zwei Systemtrennungen im Falle der Umluftkühlung von einer Systemtrennung (Frostschutzkreislauf für Kühlturm) ausgegangen.

Kühldecke oder TAB: $n = 2$

Umluftkühler: $n = 1$

Die Standardwerte für die erforderliche Temperaturdifferenz berechnen sich damit zu

Kühldecke oder TABs $\Delta T_{fK} = 17,5$ Kelvin

Umluftkühler $\Delta T_{fK} = 13,25$ Kelvin.

Liegt die Umgebungstemperatur T_U unter diesem Wert, kann 100 % der Leistung des Wasserkühlsystems in den Raum eingebracht werden. Liegt die Umgebungstemperatur zwischen $T_{U,fK}$ und der Raumtemperatur T_R beträgt die verfügbare Leistung zwischen 0 % und 100 %. Vereinfacht wird von einer linearen Abnahme der Leistung mit der Temperaturdifferenz ausgegangen. Die verfügbare Leistung zur freien Kühlung berechnet sich somit zu

$$\text{Gl. 4-21} \quad \dot{Q}_{fK,W} = \dot{Q}_{fK,W,\max} \cdot \frac{T_R - T_U}{T_R - T_{U,fK}} \quad \text{für } T_R \leq T_U \leq T_{U,fK}.$$

Die Umgebungstemperatur ist abhängig von der Art, wie die Kondensationswärme abgegeben wird. In der Berechnung werden drei Fälle unterschieden:

1. Luftkühlung: Trockener Rückkühlwert (Kühlturm): $T_U = T_A$

2. Verdunstungskühlung: Nasser Rückkühlwert (Kühlturm): $T_U = T_A - \Delta T_F$

3. Grundwasser, Erdreich Wärmesenke mit konstanter Temperatur $T_U = T_S$

Mit

ΔT_F Untertemperatur durch Verdunstung

Standardmäßig wird in der Berechnung mit $\Delta T_F = 5$ Kelvin gerechnet.

T_S mittlere Temperatur der Wärmesenke in der Kühlzeit

Der über freie Kühlung gedeckte Raumkältebedarf ergibt sich auf Zonenebene aus Gl. 4-21 durch Multiplikation mit der Stundenhäufigkeit des jeweiligen Bereiches und dem Wochenendfaktor (siehe Modul 1.3; Gl. 1.12 und 2-2).

$$\text{Gl. 4-22} \quad \dot{Q}_{fK,W,Z} = \text{Min}(\dot{Q}_{fK,W} H_K \zeta_d ; \dot{Q}_{RK,W}).$$

Die Kälteanforderung des Wassersystems an die Kälteanlage $\dot{Q}_{K,W}$ berechnet sich auf Zonenebene aus dem entsprechenden Anteil des Raumkältebedarfs, vermindert um den Beitrag der freien Kühlung

$$\text{Gl. 4-23} \quad \dot{Q}_{K,W,Z} = \dot{Q}_{RK,W} - \dot{Q}_{fK,W,Z}.$$

4.2.1.3.2 Korrektur aufgrund eingeschränkter Kühlturmnutzung

Der Kühlturm wird vorrangig von der Kälteanlage als Kondensator genutzt. Nur wenn keine Kälteanforderung existiert, kann er auch zur freien Kühlung eingesetzt werden. Für die folgende Abschätzung wird vorausgesetzt, dass

1. jede Kälteanlage einen eigenen Kühlturm hat
2. automatisch auf freie Kühlung umgestellt wird, sobald die Kälteanlage nicht läuft.

Um die Zeiten für freie Kühlung zu ermitteln, wird für jede Kälteanlage für jeden Monat des Jahres die maximale Betriebszeit ermittelt. Alle in diesem Zeitraum auftretenden Beiträge der freien Kühlung werden als zusätzliche Kälteanforderung umdeklariert. Damit sinkt der Beitrag der freien Kühlung und steigt die Kälteanforderung.

Für eine derartige Korrektur müssen aus den Monatsmittelwerten der Kälteleistung die monatlichen Betriebszeiten abgeschätzt werden. Es wird angenommen, dass die Kälteleistung kontinuierlich geregelt werden kann und die Summenhäufigkeitskurve der Leistung linear ansteigt. Die Betriebszeit der Kälteanlage berechnet sich damit nach folgender Formel

$$\text{Gl. 4-24} \quad h_{K,W} = 2 \bar{Q}_{K,W} \frac{h_{\max,W}}{\dot{Q}_{\max,W}} \quad \text{für } 2 \bar{Q}_{K,W} \leq \dot{Q}_{\max,W}$$

$$h_{K,W} = h_{\max,W} \quad \text{für } 2 \bar{Q}_{K,W} > \dot{Q}_{\max,W}$$

mit

$h_{K,W}$ Betriebszeit der Kälteanlage bei mittlerer Leistung von $\bar{Q}_{K,W}$ in h/m

$h_{\max,W}$ maximale Laufzeit der Kälteanlage in dem Monat in h/m

$\bar{Q}_{K,W}$ erforderliche mittlere monatliche Kälteleistung des Wassersystems in Watt

$\dot{Q}_{\max,W}$ raumseitige maximale Kälteleistung des Wassersystems in Watt.

Die Laufzeiten werden auf Zonenebene sowohl für die freie Kühlung als auch für die Kälteanforderung ermittelt.

Die Zonenangaben werden nun den jeweiligen Kälteanlagen zugeordnet.

Aus den Zonenangaben wird die maximale Laufzeit der jeweiligen Kälteanlage für jeden Monat ermittelt.

Für jede Zone mit freier Kühlung über das Wassersystem wird nun der Anteil der freien Kühlung berechnet, der parallel zu dem Betrieb der Kälteanlage anfällt, und damit nicht realisiert werden kann. Die nicht realisierbare Betriebszeit berechnet sich zu

$$\text{Gl. 4-25} \quad \Delta h_{fK,W} = h_{\max,W} - h_{K,W}$$

mit

$\Delta h_{fK,W}$ nicht realisierbare Betriebszeit der freien Kühlung mit dem Wassersystem.

Die nicht realisierbare Energiemenge „freie Kühlung“ berechnet sich wie folgt

$$\text{Gl. 4-26} \quad \Delta Q_{fK,W} = Q_{fK,W} \frac{\Delta h_{fK,W}}{h_{fK,W,x}}$$

mit

$\Delta Q_{fK,W}$ nicht realisierbare freie Kühlung mit dem Wassersystem

$h_{fK,W,x}$ auf Zonenebene ermittelte Betriebszeit der freien Kühlung mit dem Wassersystem

Die tatsächliche Kälteanforderung des Wassersystems berechnet sich je Zone und Monat zu

$$\text{Gl. 4-27} \quad Q_{K,W} = Q_{K,W,x} + \Delta Q_{fK,W}$$

mit

$Q_{K,W,x}$ auf Zonenebene ermittelte Kälteanforderung des Wassersystems

4.2.1.3.3 Abbilden von thermisch aktivierten Bauteilsystemen TABs

(wird aus Bericht zur Validierung übernommen)

4.2.1.4 Entfeuchtung

Bei der Entfeuchtung vereinfacht sich die Berechnung der Kälteanforderung, da freie Kühlung nicht möglich ist und nicht zwischen den vier Bereichen Ia1, Ia2, Ib und II unterschieden werden muss. Die Kälteanforderung entspricht dem Raumbedarf.

4.2.1.5 Zonenweise Zusammenfassung

Die bisherigen Berechnungen werden in jeder Zone jeweils für die 12 Monate des Jahres und für die vier Bereiche (Ia1, Ia2, Ib, II) durchgeführt. Für jede Zone werden die oben aufgeführten Berechnungen also 36mal durchgeführt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die entsprechenden Indices weggelassen.

Für die weitere Berechnung auf Kälteanlagenebene werden die Werte zusammengefasst. Für die Übergabe an die angeschlossene Kälteanlage werden folgende Größen berechnet:

- Jahreskälteanforderung

Kühlung

Durch Summenbildung über die Bereiche und die Monate berechnet sich ein Zonenwert für die Kälteanforderung des Luft- und des Wassersystems.

$$\text{Gl. 4-28} \quad Q_{K,L,Z} = \sum_{\text{Monat}} \sum_{\text{Bereich}} Q_{K,L}$$

$$\text{Gl. 4-29} \quad Q_{K,W,Z} = \sum_{\text{Monat}} \sum_{\text{Bereich}} Q_{K,W}$$

mit

$Q_{K,L,Z}$ Kälteanforderung des Luftsystems der Zone Z

$Q_{K,W,Z}$ Kälteanforderung des Wassersystems der Zone Z

Entfeuchtung

Die Jahreskälteanforderung entspricht der Summe der monatlichen Raumbedarfe.

$$\text{Gl. 4-30} \quad Q_{E,Z} = \sum_{\text{Monat}} Q_{RE}$$

Zuordnen der Kälteanlage

Dem Luft-, dem Wassersystem sowie der Entfeuchtung wird nun jeweils eine Kälteanlage zugeordnet, die die erforderliche Kälte bereitstellt. Die Kälteanlagen werden dabei mit fortlaufenden Nummern bezeichnet (allgemein Kx).

4.2.2 Strombedarf der Kälteanlage

Ein Gebäude kann eine oder mehrere Kälteanlagen enthalten. Für die weitere Berechnung wird deswegen von der zonen- auf die kälteanlagenbezogene Betrachtung übergegangen.

Die gesamte Kälteanforderung der Kälteanlage ergibt sich als Summe der Zonenwerte, die dieser Kälteanlage zugewiesen sind:

$$\text{Gl. 4-31} \quad Q_{Kx} = \sum_{\text{Zone}} Q_{K,L,Z}(Kx) + \sum_{\text{Zone}} Q_{K,W,Z}(Kx) + \sum_{\text{Zone}} Q_{E,Z}(Kx)$$

Der Strombedarf der Kälteanlage berechnet sich aus der Kälteanforderung Q_{Kx} , dem Nutzungsgrad für Übergabe, Verteilung und Speicherung und der ungewollten Entfeuchtung bei der Kälteerzeugung η_c und der Jahresarbeitszahl ε der Kältemaschine (siehe Abbildung 4-4).

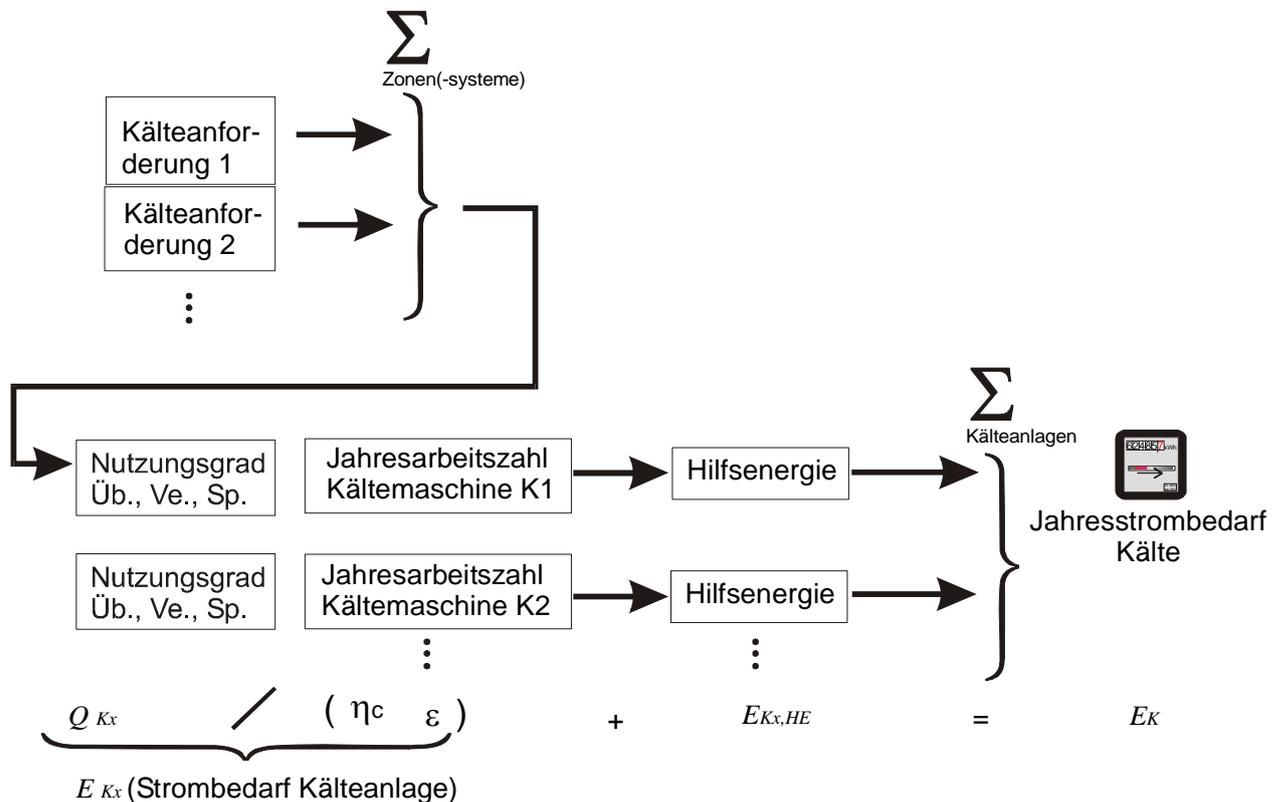


Abbildung 4-4: Gebäudeweise Berechnung von Kälteanlage und Hilfsenergie

Der Nutzungsgrad für Übergabe, Verteilung und Speicherung bei der Kälteerzeugung sowie der Einfluss der ungewollten Entfeuchtung kann aus den Tabellen der DIN V 18599 Teil 7 ermittelt werden.

Die Jahresarbeitszahl quantifiziert das Betriebsverhalten der Kälteanlage. Sie gibt an, welche Kältemenge im Mittel über alle Betriebszustände des Jahres aus einer Einheit Strom gewonnen werden kann

Gl. 4-32
$$\varepsilon = \frac{Q_{Kx}}{E_{Kx}} \text{ mit}$$

ε Jahresarbeitszahl der Kälteanlage.

Über die Höhe der Jahresarbeitszahl liegen keine verlässlichen Angaben vor. Hier soll im Rahmen der Messungen von Phase 2 Anhaltspunkte gewonnen werden. Die Jahresarbeitszahl kann vom Anwender definiert werden. Für die üblichen Betriebstemperaturen werden in Anlehnung an das SIA Kältetool folgende Standardwerte angesetzt.

Betriebstemperaturen des Kälte­träger­mediums	Jahresarbeitszahl
6°C / 12°C	3
12°C / 17°C	4

Wird eine Entfeuchtung oder eine Zuluftkühlung realisiert, sind in der Regel Betriebstemperaturen von 6/12°C erforderlich. Wird ein Flächenkühlsystem (Kühldecke oder TABs) oder ein Umluftkühler mit Kälte versorgt, kann eine 12/17°C Kälteanlage eingesetzt werden.

4.2.2.1 Hilfsenergiebedarf $E_{Kx,HE}$

Neben dem Stromverbrauch der Kälteanlage muss der Strombedarf von Umwälzpumpen, Regelung und Kühlturmventilatoren berücksichtigt werden. Dieser Strombedarf wird als Hilfsenergiebedarf bezeichnet. Über die Höhe des Hilfsenergiebedarfs gibt es keine verlässlichen Angaben. In den [AMEV Richtlinien / Kälte 96] wird eine Größenordnung von 20 % bis 30 % des Stromverbrauchs der Kälteanlage genannt. Bei dem Neubau der Helvetia in Frankfurt wurde ein Stromverbrauch für Rückkühlwerk, Pumpen und Regelung von etwa 80 % bis 100 % des Stromverbrauchs der Kältemaschine gemessen [MEG-Modul 4.2: Feinanalysen zur Klimakälte].

In der Berechnung werden zwei Anteile berücksichtigt: „Hilfsenergie allgemein“ und „Hilfsenergie Wassersystem“.

Der Strombedarf für Pumpen, Regelung sowie von Ventilatoren im Rückkühlwerk wird als allgemeine Hilfsenergie bezeichnet und pauschal berechnet. Es wird eine Aufwandszahl von

- allgemeine Hilfsenergie (Umwälzpumpen, Regelung, Ventilatoren Rückkühlwerk):

$$e_{HE,A} = 0,2$$

definiert. Der Strombedarf berechnet sich vereinfacht als Prozentwert bezogen auf den Strombedarf der Kälteanlage.

$$Gl. 4-33 \quad E_{Kx,HE} = E_{Kx} e_{HE,A}$$

mit

$e_{HE,A}$ Aufwandszahl für Hilfsenergie allgemein.

Gesondert berücksichtigt wird der Strombedarf der Umwälzpumpen beim Wassersystem. Hierbei wird die Aufwandszahl mit dem Anteil des Strombedarfs multipliziert, der auf die jeweiligen Zonen entfällt, in denen das jeweilige Wassersystem installiert ist. Es werden folgende Aufwandszahlen angesetzt:

- Umwälzpumpen bei Flächenkühlung im Raum $e_{HE,F} = 0,10$
- Umwälzpumpen und Ventilatoren bei Umluftkühlern: $e_{HE,U} = 0,06$

Die Aufwandszahlen sind zunächst nur erste Anhaltswerte. Sie werden im Rahmen der Messungen in Phase 2 dieses Projektes überprüft und gegebenenfalls angepasst. Um statistisch abgesicherte Angaben zu erhalten, ist darüber hinaus die Untersuchung einer größeren Anzahl von Anlagen erforderlich.

4.2.2.2 Strombedarf Kälte E_K

Der Strombedarf für die Bereitstellung der Kälte ergibt sich als Summe des Strombedarfs der einzelnen Kälteanlagen zuzüglich des Strombedarfs der Hilfsenergien

$$\text{Gl. 4-34} \quad E_K = \sum_{\text{Kälteanlage}} (E_{Kx} + E_{Kx,HE})$$

mit

E_K gesamter Strombedarf zur Kälteerzeugung in kWh/a

E_{Kx} Strombedarf der Kälteanlage x zur Bereitstellung der Kälte in kWh/a

$E_{Kx,HE}$ Strombedarf Hilfsenergie der Kälteanlage x in kWh/a.

4.2.3 Strombedarf Befeuchtung

Auch bei der Befeuchtung entspricht der Raumbedarf den Anforderungen an die Befeuchtungsanlage. Es wird davon ausgegangen, dass nur eine Befeuchtungsanlage in dem Gebäude vorhanden ist. In dem Fall kann aus den monatlichen Werten für den Befeuchtungsbedarf je Zone (siehe Abschnitt 4.1.2) der Jahresbefeuchtungsbedarf für das gesamte Gebäude bestimmt werden :

$$\text{Gl. 4-35} \quad Q_{\text{Befeuchtung,ges}} = \sum_{\text{Zone}} \sum_{\text{Monate}} Q_{\text{Befeuchtung}}$$

Der Stromverbrauch für die Befeuchtung berechnet sich durch Multiplikation mit einem Befeuchtungswirkungsgrad und Verteilverlusten der Dampfleitungen

$$\text{Gl. 4-36} \quad E_B = Q_{\text{Befeuchtung,ges}} \eta_B \eta_V$$

mit

E_B Jahresstrombedarf zur Befeuchtung

η_B Wirkungsgrad der Befeuchtung

η_V Verteilungswirkungsgrad der Dampfleitungen

Als Standardwert wird von Dampfbefeuchtung mit einem elektrischen Schnelldampferhitzer ausgegangen. Der Befeuchtungs- und der Verteilungswirkungsgrad werden angenommen mit

$$\eta_B = 0,95$$

$$\eta_V = 0,95.$$

4.3 Kopplung von Lüftungs- und Kältemodul

In der Regel wird in einer klimatisierten Zone eine Lüftungsanlage vorhanden sein. Die Lüftungsanlage kann je nach Anlagenkonzept Klimatisierungsfunktionen mit übernehmen. Lüftung und die Klimatisierung müssen entsprechend zusammen betrachtet werden bzw. die Rückkopplungen berücksichtigt werden.

Die Kopplung und damit der Informationsaustausch zwischen beiden Modulen geschieht über eine definierte Schnittstelle. Der Berechnungsgang ist derart, dass zunächst das Lüftungsmodul rechnet. Sollte eine aktive Kühlung vorhanden sein, werden Informationen zur Lüftungsanlage sowie Angaben zum aus hygienischen Gründen erforderlichen Luftwechsel an das Kältemodul übergeben. Das Kältemodul ermittelt, wie häufig zu Kühlzwecken ein zusätzlicher Volumenstrom erforderlich ist. Die Information über die Höhe des zusätzlichen Volumenstroms und die Betriebszeit wird an das Lüftungsmodul zurückgemeldet. Das Lüftungsmodul berechnet dann den zusätzlichen Ventilatorstrombedarf.

Tabelle 4-1 zeigt, welche Informationen von dem Lüftungsmodul an das Kältemodul übergeben werden.

Lfd. Nr.	Parameter	Einheit	Bemerkung
1	Raumnummer	-	In der Regel laufende Nummer
2	Raumgruppe (Zone)	-	
3	Nutzung	-	
4	Anzahl Räume	-	
5	Raumhöhe	m	
6	Raumlänge	m	
7	Raumtiefe	m	
8	Bodenfläche	m ²	
9	Personenbelegung	m ² /Person	
10	Nutzungstage pro Jahr	d/a	
11	Tägliche Nutzungszeit	h/d	
12	Art der Volumenstromregelung	-	variabel; 2-stufig; konstant
13	Mindestluftwechsel	h ⁻¹	Minimal von der Anlage förderbarer Luftwechsel
14	Tagesmittelwert des Luftwechsels	h ⁻¹	Über die tägliche Nutzungszeit gemittelter Luftwechsel, der aus lufthygienischen Gründen realisiert werden muss
15	Zuluftkühlung	-	x = ja; wenn die Zuluft aktiv gekühlt wird

Tabelle 4-1: Informationen, die vom Lüftungsmodul an das Kältemodul übergeben werden

Das Kältemodul gibt nach der Berechnung seinerseits die in Tabelle 4-2 dargestellten Informationen an das Lüftungsmodul zurück.

Lfd. Nr.	Parameter	Einheit	Bemerkung
1	zusätzlicher Volumenstrom für freie oder aktive Kühlung	[m ³ /h]	Zu Kühlzwecken zusätzlich geförderter Volumenstrom. Bei zweistufiger Anlage entspricht der Wert dem maximalen Volumenstrom. Bei variabler Volumenstromregelung wird zwischen vier Stufen unterschieden.
2	Betriebszeit	h/a	Zeitraum, für den der oben genannte zusätzliche Volumenstrom in dem Jahr gefördert wird; bei variabler Volumenstromregelung werden vier Werte übergeben
3	Volumenstrom Nachtlüftung	[m ³ /h]	Volumenstrom der bei Nachtlüftung realisiert wird. Er entspricht dem maximalen Volumenstrom
4	Betriebszeit Nachtlüftung	h/a	Stunden pro Jahr in der Nachtlüftung betrieben wird

Tabelle 4-2: Informationen, die vom Kältemodul an das Lüftungsmodul übergeben werden

Die vom Lüftungsmodul übergebenen Werte können im Kältemodul nicht verändert werden. Damit wird die Konsistenz zwischen den Berechnungen sichergestellt.

Um auch Zonen abbilden zu können, die keine Lüftungsanlage aufweisen aber dennoch gekühlt werden, kann in einem gesonderten Bereich des Tabellenblattes auch ohne Angaben aus dem Lüftungsmodul gerechnet werden.

4.3.1 Abschätzen der Betriebszeit

In den Berechnungen zur Klimakälte wird die Betriebszeit nicht direkt ausgewiesen. Diese muss abgeschätzt werden. Der hierzu verwendete Ansatz wird im Folgenden für die Ermittlung der Ventilatorlaufzeit beschrieben. In gleicher Weise wird auch die Laufzeit der Kälteanlage beschrieben.

Gegeben sind folgende Größen

\dot{V}_m mittlerer Zuluftvolumenstrom einer Zone je Bereich eines Monats in m³/h

\dot{V}_{\max} maximaler der Zone zuführbarer Zuluftvolumenstrom in m³/h

h Häufigkeit, mit der der betrachtete Bereich in dem betrachteten Monat auftritt in h/m

Stellt man sich die in dem Zeitintervall h zusätzlich erforderlichen Volumenströme absteigend sortiert vor, so wird angenommen, dass die Häufigkeitskurve in einem linearen Verlauf abfällt. Der Verlauf lässt sich über folgende Geradengleichung beschreiben:

$$\text{Gl. 4-37} \quad \dot{V} = \dot{V}_0 - b \cdot h_x$$

Die Steigung der Gerade entspricht

$$b = -\frac{\dot{V}_{\max}}{h}$$

Der Y-Achsenabschnitt \dot{V}_0 ergibt sich aus der Tatsache, dass die durch die Gerade und die beiden Achsen gebildete Dreiecksfläche dem Produkt $\dot{V}_m h$ entsprechen muss. Für Werte von $\dot{V}_m > 0,5 \cdot \dot{V}_{\max}$ muss dabei berücksichtigt werden, dass Teile der Dreiecksfläche außerhalb des grauen Bereiches in Abbildung 4-5 liegen

Der sich hierbei mit diesem Ansatz ergebende Verlauf der Häufigkeitskurve ist in Abbildung 4-5 dargestellt für die Fälle, dass der mittlere Volumenstrom 0,25, 0,5 und 0,75 des maximalen Volumenstroms beträgt.

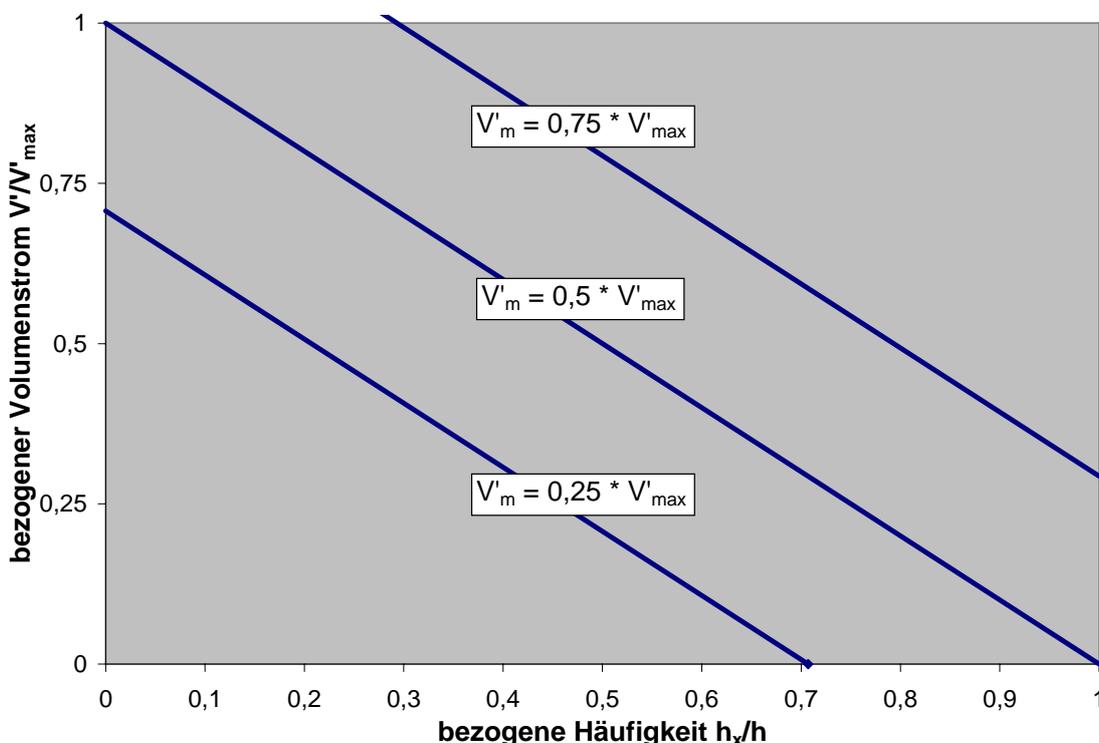


Abbildung 4-5: Verwendetes Modell zum Abschätzen der Betriebszeit

Liegt der \dot{V}_m über $0,5 \cdot \dot{V}_{\max}$ ist über das gesamten Zeitintervall h ein zusätzlicher Volumenstrombedarf erforderlich. Sinkt \dot{V}_m unter $0,5 \cdot \dot{V}_{\max}$ ergeben sich Zeiten ohne zusätzlichen Volumenstrombedarf. In dem oben angegebenen Beispiel von $\dot{V}_m = 0,25 \cdot \dot{V}_{\max}$ ist lediglich in 71% der Stunden des Bereiches ein zusätzlicher Volumenstrombedarf erforderlich.

Betriebszeit des Ventilators

In Abbildung 4-5 ist zunächst der theoretisch erforderliche zusätzliche Volumenstrom angegeben. Die Laufzeit des Ventilators hängt jedoch der Regelung ab.

Kann der Luftvolumenstrom nicht geregelt werden (konstant), ist eine Erhöhung zu Kühlzwecken nicht möglich, so dass die hier aufgezeigten Berechnungen nicht erforderlich sind.

Bei einer zweistufigen Regelung wird der Ventilator bei einem zusätzlichen Bedarf in die zweite Stufe (maximaler Volumenstrom) geschaltet werden. Es wird also zu jedem Zeitpunkt der maximale Luftvolumenstrom \dot{V}_{\max} gefördert. Die Betriebszeit des Ventilators entspricht dem Schnittpunkt der in Abbildung 4-5 dargestellten Gerade mit der x-Achse. Liegt der Schnittpunkt bei Werten über 1, entspricht die Betriebszeit der Häufigkeit h des Bereiches.

Differenzierter muss die Situation abgebildet werden, wenn der Ventilator kontinuierlich geregelt werden kann, also eine variable Volumenstromregelung vorliegt. In dem Fall wird der kontinuierliche Verlauf durch vierstufige Regelung angenähert (siehe Abbildung 4-6).

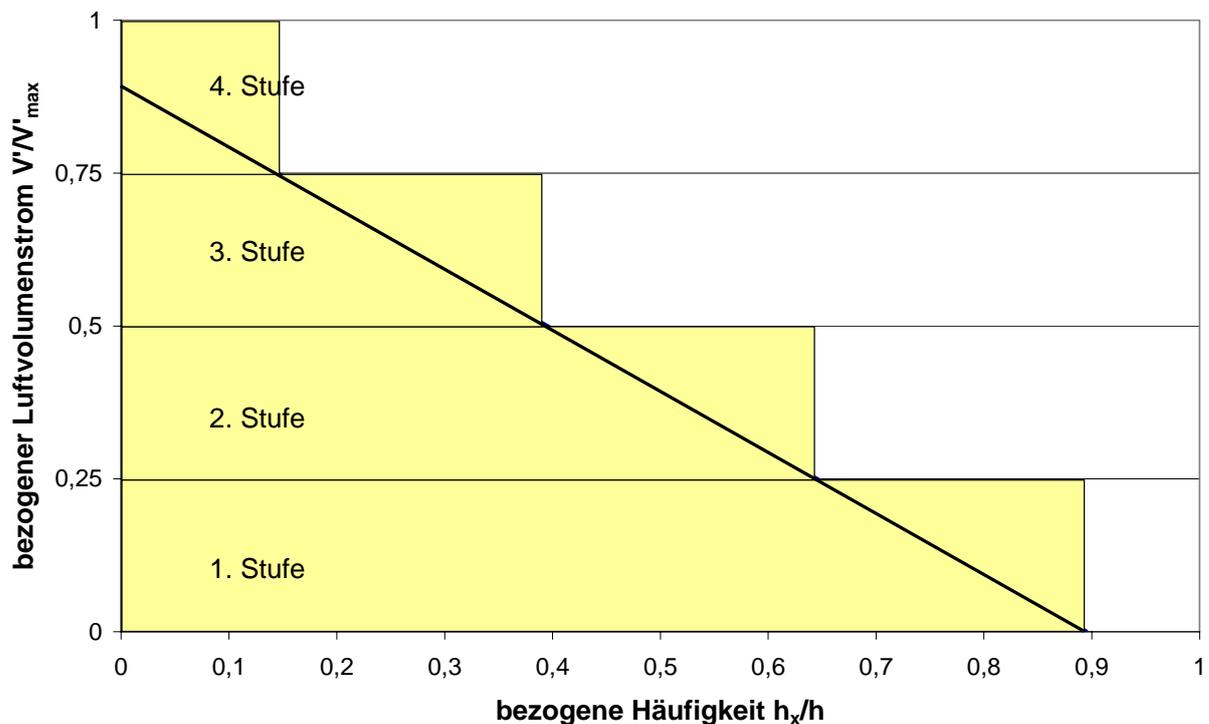


Abbildung 4-6: Modellierung der variablen Volumenstromregelung durch vier Stufen ($\dot{V}_m = 0,4 \dot{V}_{\max}$)

Über die in Gl. 4-37 dargestellte Geradengleichung wird für jede Stufe die zu dem Volumenstrom zugehörige Häufigkeit berechnet. Die Häufigkeiten der einzelnen Stufen werden übers Jahr summiert. An das Lüftungsmodul wird dann für jede der vier Stufen der Volumenstrom und die Betriebszeit übergeben.

4.4 Anmerkungen

Beheizung der Zuluft

Häufig liegt die Außenlufttemperatur unter der minimalen Zulufttemperatur bzw. $T_{K,aus}$. In dem Fall muss die Zuluft geheizt werden, um Zugerscheinungen beim Einblasen der Luft in das Gebäude zu vermeiden. Da die Heizung in der Regel nicht mit Strom erfolgt, wird dieser Energieaufwand in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Flächenkühlung

Wird ein Sollwert für die Raumlufttemperatur in einer Zone vorgegeben, liegt der Raumkältebedarf bei Flächenkühlsystemen aufgrund des Strahlungsanteils bei der Wärmeübertragung über dem von konvektiven Kühlsystemen (Luft). Grund sind die niedrigeren Oberflächentemperaturen der Außenbauteile, die zu einem Anstieg der Wärmeeinträge von außen führen. Der erhöhte Kältebedarf kann über einen Faktor ϕ berücksichtigt werden.

$$Gl. 4-38 \quad Q_{RK,Fläche} = Q_{RK} \phi$$

mit

$Q_{RK,Fläche}$ Raumkältebedarf des Flächenkühlsystems in kWh

ϕ Faktor zur Quantifizierung des Mehraufwandes eines Flächenkühlsystems verglichen mit einer konvektiven Kühlung

Für die weitere Betrachtungen wird vereinfachend $\phi = 1$ angenommen. Dies ist gerechtfertigt, da die von den Personen empfundene Temperatur (operative Temperatur) bei einem System mit Flächenkühlung geringer ist als bei einer konvektiven Kühlung. Aus diesem Grund kann, wenn man die gleiche operative Temperatur und damit den gleichen Komfort ansetzt, der Sollwert für die Raumlufttemperatur bei Flächenkühlsystemen höher gewählt werden. Dies wirkt dem Mehraufwand der Flächenkühlung entgegen. Eine genaue Bewertung dieser gegenläufigen Effekte ist Aufgabe einer Gebäude- und Anlagensimulation. Für die hier durchgeführte einfache Berechnung werden beide Effekte vernachlässigt.

5 Referenzwerte und Beurteilung

In der Planung von Neubauten oder bei der energetischen Sanierung ist es hilfreich, die für eine bestimmte Ausführungsvariante berechneten Energiekennwerte mit Grenz- und Zielwerten vergleichen zu können. Die Definition von Grenz- und Zielwerten ermöglicht zudem, einen Nachweis zur Rationellen Nutzung von Elektrizität zu erstellen. In diesem Abschnitt werden Grenz- und Zielwerte für die 24 Standardnutzungen berechnet.

5.1 Berechnung der Grenz- und Zielwerte

Grenzwerte beschreiben ein Niveau der energetischen Effizienz, das heute im Bereich der Neubauten bei guter energetischer Planung in der Regel wirtschaftlich erreicht werden kann.

Zielwerte sollen einem ambitionierten Effizienzniveau entsprechen, das mit heute am Markt verfügbaren und wirtschaftlich vertretbaren Techniken sowie einer ambitionierten energetischen Planung erreicht werden kann.

Um das Anforderungsniveau für die Grenzwerte zu definieren wird ein guter Gebäudestandard und eine mittlere Nutzungsintensität angenommen. Als Anlagentechnik wird eine Lüftungsanlage angesetzt, die den hygienischen Mindestluftwechsel fördert. Eine Erhöhung des Luftwechsels aus Kühlzwecken erfolgt nicht. Je nach Nutzung wird als Spitzenlastsystem eine Kühldecke oder ein Umluftkühler verwendet. Als Jahresarbeitszahl der Kälteanlage wird ein Wert von 4 angesetzt. Der elektrische Energiebedarf für Hilfsenergien (Pumpen, Regelung, Rückkühlwerk) ist in den Kennwerten nicht enthalten. Ausführlich sind die Annahmen der Berechnung in Abschnitt 5.2 dokumentiert.

Der Zielwert wird weitgehend unter gleichen Randbedingungen ermittelt. Die Fensterfläche wird jedoch von 60 % auf 40 % reduziert und freie Kühlung mit dem Wassersystem betrieben.

	Fensterflächenanteil	Freie Kühlung mit Wassersystem
	%	-
Zielwert	40	Ja
Grenzwert	60	Nein

Table 5-1: Unterschiede im Berechnungsmodell für Grenz- und Zielwerte

Berechnet sind die Kennwerte Klimakälte mit dem im Forschungsprojekt MEG erstellten Berechnungsverfahren Klimakälte (Version 2.0; Stand 12. September 2005). Die Wetterdaten entsprechen dem Standardklima Deutschland aus der DIN 4108-6: 2003-06. Nicht in der DIN enthaltene Daten sind mit Werten aus dem Standort Würzburg ergänzt.

Für die so definierten Randbedingungen wird mit der Excelarbeitshilfe Klimakälte die spezifische Kälteleistung sowie der spezifische Strombedarf für die Kühlkälte ermittelt.

Die Vollbetriebszeit berechnet sich als Quotient dieser beiden Werte

$$\text{Gl. 5-1} \quad t_B = \frac{e}{p}$$

mit

- t_B Vollbetriebszeit in h/a
 e spezifischer Strombedarf in kWh/(m²a)
 p spezifische Kälteleistung in W/m².

Für diese Annahmen ergeben sich die in Abbildung 5-1 dargestellten Grenz- und Zielwerte für den Strombedarf der Kühltälte. Die Kennwerte sind mit der Netto-Grundfläche des Zone gebildet. Die hier ausgewiesenen Kennwerte sollen in der VDI 3807 Blatt 4 zur Quantifizierung eines „sehr geringen“ und eines „geringen“ Stromverbrauchs für Kühlung herangezogen werden. Die Diskussion in den entsprechenden Gremien kann zu Änderungen in den Randbedingungen und damit Zahlenwerten führen.

Strombedarf Kühltälte	Grenzwert			Zielwert		
	spez. elektr. Kälteleistung W/m ²	Voll-laststunden h/a	spez. el. Energie-bedarf [kWh/(m ² a)]	spez. elektr. Kälteleistung W/m ²	Voll-laststunden h/a	spez. el. Energie-bedarf [kWh/(m ² a)]
1 Einzelbüro	10	557	6	9	234	2
2 Gruppenbüro	11	593	6	10	217	2
3 Grossraumbüro	17	855	14	17	262	4
4 Sitzungszimmer	15	436	7	14	199	3
5 Schalterhalle	10	683	7	9	214	2
6 Verkauf (Non-Food, ohne Kühlprodukte)	13	530	7	13	309	4
7 Verkauf (Food, mit Kühlprodukten)	8	170	1	8	154	1
8 Warenhaus, Einkaufszentrum	16	360	6	16	254	4
9 Klassenzimmer (Realschule, Gymnasium)	19	145	3	18	134	2
10 Klassenzimmer (Grundschule)	20	118	2	19	104	2
11 Hörsaal (Hochschule, Universität)	30	737	22	30	257	8
12 Bettenzimmer (2 Betten, Kkh., Pflegeheim)	12	499	6	12	446	5
13 Hotelzimmer (Doppelzimmer)	11	616	7	10	432	4
14 Kantine	24	147	4	24	131	3
15 Restaurant	22	362	8	22	287	6
16 Küche zu Kantine	111	439	49	110	212	23
17 Küche zu Restaurant	114	814	93	113	373	42
18 Werkstatt	33	150	5	33	144	5
24 Serverraum, Rechenzentrum (ULK)	40	6377	258	40	1566	63

Abbildung 5-1: Grenz- und Zielwerte für den elektrischen Energiebedarf Kühlung

5.2 Standardrandbedingungen

Zur Ermittlung der Grenz- und Zielwerte müssen die Berechnungsrandbedingungen definiert werden. Diese werden im Weiteren als Standardrandbedingungen bezeichnet. Sie lassen sich in die Bereiche einteilen:

- Standardrandbedingungen - Nutzung
- Standardrandbedingungen-Baukörper
- Standardrandbedingungen-Anlagentechnik.

Die Standardrandbedingungen werden im Folgenden dokumentiert. Bei der Anwendung der Excel-Arbeitshilfe werden die Standardrandbedingungen als Vorbelegung der Eingabefelder verwendet sobald eine Standardnutzung im Tabellenblatt „Eingabe Zone“ gewählt wird und können so visualisiert werden. Alternativ können die Standardrandbedingungen in der Standarddatenbank eingesehen werden.

Standardrandbedingungen - Nutzung

Die Standardrandbedingungen - Nutzung sind für 24 unterschiedliche Nutzungen in Modul 1.2 definiert.

Standardrandbedingungen - Baukörper und Standardrandbedingungen - Anlagentechnik

- Tabelle 5-2 zeigt die Berechnungsrandbedingungen, die für Grenz- und Zielwert sowie alle Nutzungen identisch sind.
- In Tabelle 5-3 sind die Standardrandbedingungen für Nutzung und Baukörper dokumentiert, die für Grenz- und Zielwert identisch sind, sich aber je Nutzung unterscheiden.
- In Tabelle 5-4 sind die Berechnungsrandbedingungen zur Anlagentechnik dokumentiert, die für Grenz- und Zielwert identisch sind, sich aber je Nutzung unterscheiden. Um Rückkopplungen zu den Grenz- und Zielwerten für die Lüftung zu vermeiden, wird angenommen, dass der Volumenstrom nicht zu Kühlzwecken erhöht wird. In der Berechnung wird dies umgesetzt, indem eine Konstantvolumenstromanlage angenommen wird, die den im Lüftungsmodul berechneten hygienisch erforderlichen Grundluftwechsel (Tagesmittelwert) fördert.

Baukörper	
Standardorientierung [N, O, S, W]	S
Geometrikennziffer (0 bedeutet: nur eine Außenfassade)	0
Standardbauweise [schwer, mittel, leicht]	Mittel
Speicherkapazität Decke [Wh/(m ² *K)]	1
Speicherkapazität Boden [Wh/(m ² *K)]	54
Speicherkapazität Außenwand [Wh/(m ² *K)]	54
Speicherkapazität Innenwand [Wh/(m ² *K)]	21
U-Wert opak [W/(m ² *K)]	0,25
U-Wert Fenster [W/(m ² *K)]	1,40
g-Wert Verglasung [-]	0,60
Rahmenanteil [%]	30
Reduktionsfaktor Beschattung und Verschmutzung [-]	0,75
Anlagentechnik / Zonenweise	
Natürlicher Luftwechsel (durch Undichtigkeiten) [h-1]	0,10
Fensterlüftung während der Nutzungszeit [h-1]	0,00
Zuluftkühlung möglich [ja/nein]	Ja
Nachtlüftung [ja/nein]	Nein
Temperaturerhöhung: Ventilator und Wärmeeinträge in Kanäle [K]	1,5
Spez. Leistung des Wassersystems [W/m ²]	Nicht begrenzt
Anlagentechnik / Kältezentrale	
Jahresarbeitszahl	4
Kondensator Kühlung	Luftkühlung
Nutzungsgrad zur Berücksichtigung für Übergabe, Verteilung und Speicherung sowie ungewollte Entfeuchtung	0,8

Tabelle 5-2: Für Grenz- und Zielwerte und alle Nutzungen identische Berechnungsrandbedingungen

Nutzung und Baukörper	Raumhöhe [m]	Raumlänge [m]	Raumtiefe [m]	Bodenfläche [m ²]	Nutzungstage pro Jahr [d/a]	tägliche Nutzungszeit [h/d]
1 Einzelbüro	3	3	6	18	250	11
2 Gruppenbüro	3	6	6	36	250	11
3 Grossraumbüro	3	12	12	144	250	11
4 Sitzungszimmer	3	6	6	36	250	11
5 Schalterhalle	4	12	12	144	250	11
6 Verkauf (ohne Kühlprodukte)	4	20	20	400	300	12
7 Verkauf (mit Kühlprodukten)	4	20	20	400	300	12
8 Warenhaus, Einkaufszentrum	4	40	40	1600	300	12
9 Klassenzimmer	3	9	9	74	200	9
10 Klassenzimmer (Grundschule)	3	6	6	36	200	6
11 Hörsaal	4	20	20	400	250	10
12 Bettzimmer (Pflegeheim)	3	4	4	16	365	24
13 Hotelzimmer (Doppelzimmer)	3	4	4	16	365	12
14 Kantine	3	20	20	400	250	7
15 Restaurant	3	12	12	144	300	12
16 Küche zu Kantine	3	12	12	144	250	9
17 Küche zu Restaurant	3	6	6	36	300	12
18 Werkstatt	4	20	20	400	250	9
24 Serverraum, Rechenzentrum	3	6	6	36	365	24

Tabelle 5-3: Bei Grenz- und Zielwerten identische Berechnungsrandbedingungen für Nutzung und Baukörper

Anlagentechnik	Art der Volumenstromregelung	Maximaler Luftwechsel [h ⁻¹]	hyg. Grundluftwechsel (Tagesmittelwert) [h ⁻¹]	max. Zulufttemp.-differenz [K]	Wassersystem - Kühldecke - TAB - Konvektor
1 Einzelbüro	konstant	1,1	1,1	3	Kühldecke
2 Gruppenbüro	konstant	1,1	1,1	3	Kühldecke
3 Grossraumbüro	konstant	2,3	2,3	3	Kühldecke
4 Sitzungszimmer	konstant	2,8	2,8	3	Kühldecke
5 Schalterhalle	konstant	0,5	0,5	3	Kühldecke
6 Verkauf (Non-Food, ohne Kühlprodukte)	konstant	1,2	1,2	8	Umluftkühler
7 Verkauf (Food, mit Kühlprodukten)	konstant	1,2	1,2	8	Umluftkühler
8 Warenhaus, Einkaufszentrum	konstant	2,0	2,0	8	Umluftkühler
9 Klassenzimmer (Realschule, Gymnasium)	konstant	3,9	3,9	8	Umluftkühler
10 Klassenzimmer (Grundschule)	konstant	4,2	4,2	8	Umluftkühler
11 Hörsaal (Hochschule, Universität)	konstant	3,0	3,0	8	Umluftkühler
12 Bettzimmer (2 Betten, Kkh., Pflegeheim)	konstant	3,0	3,0	8	Umluftkühler
13 Hotelzimmer (Doppelzimmer)	konstant	1,5	1,5	8	Umluftkühler
14 Kantine	konstant	5,0	5,0	8	Umluftkühler
15 Restaurant	konstant	3,9	3,9	8	Umluftkühler
16 Küche zu Kantine	konstant	21,3	21,3	8	Umluftkühler
17 Küche zu Restaurant	konstant	20,0	20,0	8	Umluftkühler
18 Werkstatt	konstant	5,9	5,9	8	Umluftkühler
24 Serverraum, Rechenzentrum (ULK)	konstant	0,1	0,1	8	Umluftkühler

Tabelle 5-4: Bei Grenz- und Zielwerten identische Berechnungsrandbedingungen für Anlagentechnik

5.3 Bewertung des Anforderungsniveaus der Grenzwerte

Anmerkung:

Die in diesem Abschnitt gemachten Ausführungen gelten für die Grenzwerte der Version 1.1 der Excel-Arbeitshilfe Klimakälte. Seit September 2005 gibt es die Version der Excel-Arbeitshilfe 2.0 mit leicht geänderten Grenz- und Zielwerten. Die Änderungen führen jedoch zu keiner substantiellen Änderung des Anforderungsniveaus, so dass die Aussagen dieses Abschnittes im Wesentlichen weiterhin gelten.

Um das über die Grenzwerte festgelegte Anforderungsniveau zu überprüfen, werden Beispielrechnungen durchgeführt. Herangezogen wird das in [Knissel 1999] definierte einfache Bürogebäude mit zweibündigem Rechteckgrundriss. Ausgangspunkt zur Definition des Baukörpers und der Anlagentechnik ist die Variante Niedrigenergie-Bürogebäude.

Bei dem Verwaltungsgebäude handelt es sich um ein 5-stöckiges Gebäude der Dimension 90 m x 11 m x 16,5 m (L x B x H) mit 4.400 m² Netto-Grundfläche. Die Geschosshöhe beträgt 3,30 m. Das Gebäude ist in Massivbauweise mit Lochfenstern ausgeführt. Nebennutzflächen wie Garderobe, WC, Teeküchen usw. sind in einem zentralen Kernbereich und an den Stirnseiten angeordnet. Der Keller ist unbeheizt. Abb. 5-1 zeigt eine schematische Ansicht und die über alle Geschosse einheitliche Zonierung.

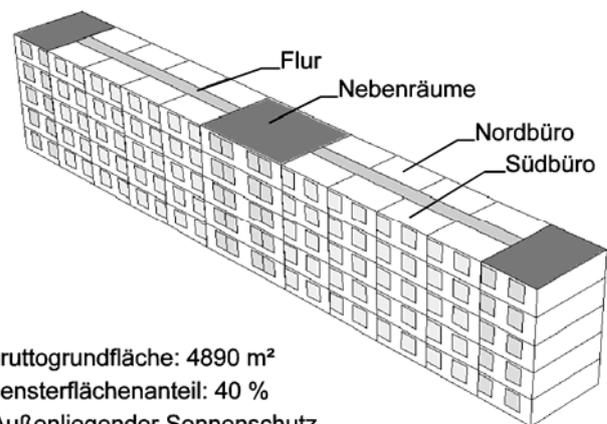
Die Aufteilung der Flächen auf Büro-, Flur- und Nebenflächen entspricht den in der VDI 3807 angegebenen mittleren Flächenverhältnissen für Verwaltungsgebäude (siehe Tabelle 5-5).

Die Büros haben lichte Abmaße von 7,5 m x 4 m x 3 m (L x B x H) und sind mit jeweils zwei Personen besetzt. Der Fensterflächenanteil beträgt 40 % bezogen auf die Innenfläche der Außenwand, bzw. 0,3 m² pro m² Hauptnutzfläche. Die Verschattung der Fenster erfolgt über einen außen liegenden Sonnenschutz.

Weitere Einzelheiten sind in Tabelle 5-5 und in [Knissel 1999] zu finden.

Für das so definierte Gebäude wird der Strombedarf für die Kühlung berechnet.

Innerhalb jeder Nutzungszone wird zwischen dem Normal-, dem Dach- und dem Kellergeschoss unterschieden. Die zonenweise Gegenüberstellung der berechneten Objektkennwerte zu den Grenz- und Zielwerten zeigt Tabelle 5-6. Die gebäudeweise Zusammenfassung, die auch als Nachweis verwendet werden kann, ist in Tabelle 5-7 zu sehen.



Bruttogrundfläche: 4890 m²
 Fensterflächenanteil: 40 %
 Außenliegender Sonnenschutz

Abb. 5-1: Skizze des untersuchten Beispielgebäudes

Baukörper				
	Länge	Breite	Höhe	Nettogrundfläche [m²]
Gebäudeabmessung	90	11	16,5	4.400
Büro (Mittelwert)	7,5	4	3	30
	Hauptfassade	Nebenfassade		
Fensterflächenanteil [%]	40	0		
Sonnenschutz	Außen liegende Aluminiumlamellen; $F_C = 0,25$			
	Außenw.	Dach	Kellerdecke	Fenster
Dämmstoffstärke [cm]	18	22	14	$g_V=0,53^*$
U-Wert [W/(m ² K)]	0,21	0,17	0,25	$u_f=1,4$
Luftdichtheit der Gebäudehülle: hoch, mittlerer Luftwechsel über Undichtigkeiten $n_U = 0,1 \text{ h}^{-1}$				
Zugängliche Speichermassen: Außenwand, Decke, Fußboden				
*)zusätzliche Reduktionsfaktoren: Verschmutzung = 0,9; Rahmenanteil = 30 %; Verschattung = 0,84				

Nutzung		
Zone	Anteil an NGF	Standardnutzung
Büro (Süd)	27 %	Gruppenbüro
Büro (Nord)	27 %	Gruppenbüro
Flur	14 %	Lager (Technik, Archiv)
Nebenräume	32 %	Verkehrsfläche (Flur)

Anlagentechnik			
Lüftung	<ul style="list-style-type: none"> Keine Fensterlüftung Mechanische Lüftungsanlage mit konstantem Luftvolumenstrom für hygienischen Mindestaußenluftwechsel 		
Luftwechsel in h^{-1}	Büro	Flur	Nebenräume
<ul style="list-style-type: none"> während Betriebszeit außerhalb Betriebszeit (Undichtigkeiten) 	1,3 + 0,1 0,1	0,4 + 0,1 0,1	0,4 + 0,1 0,1
Kühlung	<ul style="list-style-type: none"> Wassersystem: Kühldecken in den Büros Luftkühlung in Büros, Fluren und Nebenräumen; die maximale Zulufttemperaturdifferenz beträgt 3 Kelvin Kälteanlage: Jahresarbeitszahl 4 		

Tabelle 5-5: Zusammenfassung der wichtigsten Kenndaten des Beispielgebäudes

Übersicht der Zonen - Grenz- und Zielwerte																	
Übersicht erstellen												Startmenü					
Standardnutzungen (Vergleichskennwerte)			Anforderungen						Objektwerte								
lauf. Nr.	Nutzungen	Standard-nutzung verwendet	Grenzwerte			Zielwerte			Zonenwerte								
			max. el. Leistung [W/m²]	Vollbetriebszeit [h/a]	spez. Strombedarf Kühlung [kWh/(m²a)]	max. el. Leistung [W/m²]	Vollbetriebszeit [h/a]	spez. Strombedarf Kühlung [kWh/(m²a)]	Anzahl Räume [-]	Fläche der Zone [m²]	max. el. Leistung [W/m²]	Vollbetriebszeit [h/a]	spez. Strombedarf Kühlung [kWh/(m²a)]	absoluter Strombedarf Kühlung [kWh/a]			
1	Gruppenbüro	x	8,1	576	4,7	7,3	283	2,1	6	120	7,4	466	3,4	2475			
2	Gruppenbüro	x	8,1	576	4,7	7,3	283	2,1	2	120	5,8	269	1,6	376			
3	Gruppenbüro	x	8,1	576	4,7	7,3	283	2,1	2	120	5,8	269	1,6	376			
4	Gruppenbüro	x	8,1	576	4,7	7,3	283	2,1	6	120	6,5	360	2,3	1682			
5	Gruppenbüro	x	8,1	576	4,7	7,3	283	2,1	2	120	5,4	173	0,9	226			
6	Gruppenbüro	x	8,1	576	4,7	7,3	283	2,1	2	120	5,4	173	0,9	226			
7	Verkehrsfläche (Flur)	x							6	60	0,3	725	0,2	78			
8	Verkehrsfläche (Flur)	x							2	60	0,3	293	0,1	11			
9	Verkehrsfläche (Flur)	x							2	60	0,3	293	0,1	11			
10	Lager (Technik; Archiv)	x							6	153	0,3	107	0,0	29			
11	Lager (Technik; Archiv)	x							2	153	0,3	136	0,0	12			
12	Lager (Technik; Archiv)	x							2	153	0,3	136	0,0	12			
Fläche [m²]										4.525							
Grenzwert, absolut [MWh/a]					11,2												
Zielwert, absolut [MWh/a]								5,0									
absoluter Objektwert aller gekühlten Zonen [MWh/a]													5,5				
Alle Zonen mit Standardnutzungen gerechnet?		Ja															

Tabelle 5-6: Zonenweise Gegenüberstellung der Grenz- bzw. Zielwerte und der Objektwerte

MEG		Modul Klimakälte		
Objekt		Nachweis Rationelle Verwendung von Elektrizität		
Projekt	Beispielgebäude	Nettogrundfläche		
Adresse		gekühlt	nicht gekühlt	Total
Bauherr		4397 m ²	4 m ²	4401 m ²
Architekt		Bruttogrundfläche 4890 m ²		
Planer Kälteanlagen		Elektrizitätsbedarf Kühlkälte (absolut)		
Energieberatung		Grenzwert	Zielwert	Objektwert
Klimatensatz:		11,2 MWh/a	5,0 MWh/a	5,5 MWh/a
Standardnutzungen verwendet?:		Spezifischer Elektrizitätsbedarf Kühlkälte (bez. auf EBF)		
		Systemanforderung		erfüllt
		Grenzwert	Zielwert	Objektwert
		2,6 kWh/m ² a	1,1 kWh/m ² a	1,3 kWh/m ² a
		Teilenergiekennwert Elektrizität Kühlkälte (bez. auf BGF)		
		Grenzwert	Zielwert	Objektwert
		2,3 kWh/m ² a	1,0 kWh/m ² a	1,1 kWh/m ² a
		Standard Deutschland		
		Ja		
Für die Berechnung des Nachweises müssen Standardnutzungen und der Klimatensatz "Standard Deutschland" verwendet werden				
Datum	24. September 2004	Software Version 1.1 - September 2004		

Tabelle 5-7: Nachweis rationeller Verwendung von Elektrizität im Bereich Kühlkälte für das in Tabelle 5-5 skizzierte Bürogebäude

Das untersuchte Beispielgebäude unterschreitet mit einem Nachweis-Kennwert von 1,3 kWh/(m²_{NGF} a) in der hier beschriebenen Ausführung den Grenzwert von 2,6 kWh/(m²_{NGF} a) deutlich. Es liegt nah an dem Zielwert von 1,1 kWh/(m²_{NGF} a).

Ausgehend von dieser Basisvariante wird im Weiteren untersucht, welcher Fensterflächenanteil bei der Variation von Sonnenschutz und Orientierung realisiert werden kann, um den Grenzwert gerade noch zu unterschreiten.

Bei einer Nord-Südorientierung ist ein innenliegender Sonnenschutz bis zu einem Fensterflächenanteil von 40 % möglich. Ein außenliegender Sonnenschutz erlaubt einen Fensterflächenanteil von 100 %. Möglich wird dieser hohe Fensterflächenanteil, da in dem untersuchten Objekt zusätzliche Wärmeverluste über Dach und Keller auftreten und 50 % der Büros nach Norden orientiert sind. Bei der Ermittlung der Grenzwerte wurden keine Verluste über Dach und Keller sowie eine reine Südorientierung angenommen.

Bei einer Ost-West-Orientierung ergeben sich deutlich höhere solare Einträge. Ein Unterschreiten des Grenzwertes ist nur bei einem Fensterflächenanteil von 50 % möglich. Wird eine starke Nachlüftung (max. Zulufttemperaturdifferenz 8 Kelvin) realisiert, ergibt sich ein zulässiger Fensterflächenanteil von 60 %, bei freier Kühlung über das Wassersystem ist ein zulässiger Fensterflächenanteil von 70 % möglich.

Über die Grenzwerte wird also ein plausibles Anforderungsniveau für das Gesamtsystem Baukörper und Anlagentechnik gestellt.

6 Literaturverzeichnis

- [AMEV Richtlinien / Kälte 96] Hinweise zur Planung, Ausführung und Betrieb von Kälteanlagen und Kühlgeräten für öffentliche Gebäude (Kälte 96); Aufgestellt und herausgegeben vom Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen; Bonn, 1996
- [Elsberger 2001] Elsberger, M.: Nutzenergiebedarf klimatisierter Gebäude mittels Monatsbilanzierung; IfE Schriftenreihe – Heft 43; Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München; München 2001
- [Humm 2003] Humm O.: Mit Bauteilen kühlen und heizen; in Heizung-Lüftung/Klima-Haustechnik, HLH Bd. 54 (2003) Nr.5
- [Knissel 1999] Knissel, Jens: Energieeffiziente Büro- und Verwaltungsgebäude – Hinweise zur primärenergetischen und wirtschaftlichen Optimierung; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt 1999
- [Rouvel 1997] Rouvel, L; S. Kolmentz : Thermische Bewertung von Gebäuden unter sommerlichen Randbedingungen; Gesundheitsingenieur, Jahrgang 1997, Heft 2, Seiten 65 bis 74

7 Formelverzeichnis

B	$\text{m}^3 \text{ Mon/h}^2$	Steigung, mit der sortierte Volumenstromwerte fallen
C	$\text{Wh}/(\text{m}^3 \text{ K})$	Volumenspezifische Wärmekapazität von Luft
E	$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	spezifischer Strombedarf
e_{HE}	kWh	Aufwandszahl für die Hilfsenergieanwendung
E_B	kWh	Gesamter Strombedarf für die Befeuchtung
E_K	KWh/a	Gesamter Strombedarf der Kälteanlagen
E_{Kx}	kWh	Strombedarf der Kälteanlage K_x
$E_{Kx,HE}$	KWh/a	Strombedarf für Hilfsenergie der Kälteanlage K_x
H	h/m	Häufigkeit, mit der ein Bereich in einem Monat auftritt
$h_{fK,W,x}$	h/m	auf Zonenebene ermittelte monatliche Betriebszeit der freien Kühlung mit dem Wassersystem
$h_{max,W}$	h/m	maximal mögliche monatliche Betriebszeit des Wassersystems
$h_{K,W}$	h/m	Betriebszeit der Kälteanlage bei erforderlicher mittlerer Leistung von $\bar{Q}_{K,W}$
$\Delta h_{fK,W}$	h/m	nicht realisierbare Betriebszeit der freien Kühlung
K_x	-	Kälteanlage Nummer x
$m_{Feuchte}$	kg	im Raum freigesetzte Feuchte durch Personen und sonstige Feuchtequellen
m_{Zuluft}	kg	Masse der zugeführten Zuluft in dem betrachteten Zeitraum
N	Stück	Anzahl der Systemtrennungen
P	W/m^2	spezifische Kälteleistung
$Q_{Befeuchtung}$	kWh	Befeuchtungsbedarf je Zone und Monat
$Q_{Befeuchtung, ges}$	kWh/a	Jahresbefeuchtungsbedarf für das gesamte Gebäude
$Q_{E,Z}$	kWh/a	Jahreskältebedarf der Zone Z zur Entfeuchtung
$Q_{fK,L}$	kWh	durch freie Kühlung mit dem Luftsystem abgeführte Raumkühllast
$Q_{fK,G}$	kWh	Grundbetrag der freien Kühlung mit dem Luftsystem
$Q_{fK,+}$	kWh	Durch einen erhöhten Luftwechsel zusätzlich erzielbarer Beitrag der freien Kühlung mit dem Luftsystem
$Q_{fK,W}$	kWh	tatsächlicher Beitrag der freien Kühlung über das Wassersystem
$Q_{fK,W,Z}$	kWh	auf Zonenebene ermittelter Beitrag der freien Kühlung über das Wassersystem

$Q_{K,L}$	kWh	Kälteanforderung des Luftsystems
$Q_{K,L,Z}$	KWh/a	Jahreskälteanforderung des Luftsystems
$Q_{K,W}$	kWh	korrigierte Kälteanforderung des Wassersystems an die Kälteanlage
$Q_{K,W,x}$	kWh	auf Zonenebene ermittelte Kälteanforderung des Wassersystems
Q_{KB}	kWh	Jahreskältebedarf
Q_{Kx}	KWh/a	Gesamte Kälteanforderung einer Kälteanlage für alle zugewiesenen Zonen
Q_{RE}	kWh	Raumentfeuchtungsbedarf
Q_{RK}	kWh	Jahresraumkältebedarf
$Q_{RK,Fläche}$	kWh	Raumkältebedarf bei einem Flächenkühlsystem
$Q_{RK,L}$	kWh	Anteil des Raumkältebedarfs vom Luftsystem
$Q_{RK,W}$	kWh	Anteil des Raumkältebedarfs vom Wassersystem
Q_{Vv}	kWh	Verteilverluste
$\dot{Q}_{fK,W}$	Watt	Beim Wassersystem verfügbare Leistung zur freien Kühlung
$\dot{Q}_{fK,W,max}$	Watt	Maximale Leistung des Wassersystems zur freien Kühlung
$\dot{Q}_{max,W}$	Watt	raumseitige, maximale Leistung des Wassersystems
$\dot{Q}_{K,F}$	Watt	Kälteleistung des Flächenkühlsystems
$\dot{Q}_{K,L}$	Watt	Kälteleistung der Luftkühlung
$\dot{Q}_{K,U}$	Watt	Kälteleistung des Umluftkühlers
$\bar{Q}_{K,W}$	Watt	erforderliche mittlere monatliche Kälteleistung des Wassersystems in Watt
$\Delta Q_{fK,W}$	KWh/m	nicht realisierbare freie Kühlung mit dem Wassersystem
r_0	kJ/kg	Verdampfungsenthalpie von Wasser
t_B	H	Vollbetriebszeit
t_{BE}	H	Be- bzw. Entfeuchtungszeitraum innerhalb eines Monats
t_N	H	Anzahl der Stunden mit Nachtlüftung
t_{RK}	H	Anzahl der Stunden, in denen Raumkältebedarf besteht
$\Delta T_{Ein-Aus}$	K	Temperaturspreizung zwischen Ein- und Austritt
$\Delta T_{Ein-Aus,KTM}$	K	Temperaturspreizung beim Kälteübertragungsmedium
$\Delta T_{Ein-Aus,U}$	K	Temperaturspreizung der Umgebung
ΔT_F	K	Untertemperatur durch Verdunstung

ΔT_{fk}	K	erforderliche Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf- und Außenlufttemperatur
ΔT_{Kanal}	K	Temperaturerhöhung der Zuluft im Lüftungskanal
$\Delta T_{WÜ}$	K	Erforderliche Temperaturdifferenz zur Wärmeübertragung
ΔT_{Vent}	K	Temperaturerhöhung der Zuluft im Ventilator
ΔT_V	K	Temperaturerhöhung der Zuluft im Kanalnetz und Ventilator
$\Delta T_{Zu,max}$	K	Maximale Zulufttemperaturdifferenz
T_A	°C	Außenlufttemperatur
$T_{A,N}$	°C	Außenlufttemperatur während Nachtlüftung
T_C	°C	Kondensatortemperatur
T_E	°C	Verdampfertemperatur
$T_{K,aus}$	°C	Austrittstemperatur aus der Kältezentrale
T_R	°C	Mittlere Raumlufthtemperatur
$T_{R,max}$	°C	Maximale Raumlufthtemperatur
T_S	°C	Mittlere Temperatur der Wärmesenke in der Kühlzeit
T_U	°C	Umgebungstemperatur (Luft, Wasser oder Erdreich)
$T_{U,fk}$	°C	Erforderliche Umgebungstemperatur zur freien Kühlung (Leistung 100%) bei einem Wassersystem
$T_{U,KK}$	°C	Umgebungstemperatur
T_{Zu}	°C	Zulufttemperatur
$T_{Z,Ein}$	°C	Eintrittstemperatur des Kälteübermittlers in die Zone
$T_{Z,min}$	°C	Minimale Eintrittstemperatur des Kälteübermittlers in die Zone
\dot{V}	m ³ /h	Zuluftvolumenstrom
\dot{V}_+	m ³ /h	über den Grundvolumenstrom hinaus erhöhter Zuluftvolumenstrom
\dot{V}_G	m ³ /h	Grundvolumenstrom
\dot{V}_m	m ³ /h	Mittlerer Zuluftvolumenstrom einer Zone in einem Monat je Bereich
\dot{V}_{max}	m ³ /h	maximaler der Zone zuführbarer Zuluftvolumenstrom
\dot{V}_{Zu}	m ³ /h	Zuluftvolumenstrom
\dot{V}_0	m ³ /h	Y-Achsenabschnitt der Geradengleichung für die abfallend sortierten Volumenströme
$x_{Außenluft}$	g/kg	absolute Feuchte der Außenluft

x_{Raum}	g/kg	Sollwert der absoluten Feuchte im Raum
x_{Zuluft}	g/kg	absolute Feuchte der Zuluft
Z	-	Zone
ϕ	-	Faktor zur Quantifizierung des Mehraufwandes eines Flächenkühlsystems
ρ_L	kg/m ³	Dichte der Luft (bei Umgebungsdruck und 20°C)
η_B	-	Befeuchtungswirkungsgrad
η_C	-	Carnot'scher Wirkungsgrad
η_{ex}	-	exergetischer Wirkungsgrad (Carnot'sche Gütezahl)
$\eta_{V,A}$	-	Jahresnutzungsgrad des Verdichterantriebs
$\eta_{V,T}$	-	mittlerer Teillastfaktor des Verdichters
η_V	-	Verteilverluste der Dampfleitungen bei der Befeuchtung
ζ_d	-	Betriebszeitfaktor
ε	-	Jahresarbeitszahl der Kälteanlage
ε_{ideal}	-	Aus Carnot'schem Wirkungsgrad berechnete ideale mittlere Arbeitszahl der Kälteanlage
ε_{real}	-	unter realen Bedingungen erzielbare Arbeitszahl
σ_T	Kelvin	Standardabweichung der Außenlufttemperatur
ψ	-	Intensitätsfaktor Nachtlüftung

Indicec

B	Bereich (Ia1, Ia2, Ib, II)
M	Monat

8 Anhang: Ermittlung der Jahresarbeitszahl

Die Jahresarbeitszahl wird ermittelt, indem aus den Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen der Carnotfaktor und daraus die mittlere ideale Arbeitszahl bestimmt wird. Diese wird mit dem exergetischen Wirkungsgrad (auch als Carnot'scher Gütegrad bezeichnet) und den Nutzungsgraden von Verdichter und Antriebsaggregat multipliziert, um die Jahresarbeitszahl zu ermitteln.

$$\text{Gl. 8-1} \quad \varepsilon = \varepsilon_{ideal} \eta_{ex} \eta_{V,T} \eta_{V,A}$$

mit

ε	Jahresarbeitszahl
ε_{ideal}	ideale mittlere Arbeitszahl
η_{ex}	exergetischer Wirkungsgrad (Carnot'sche Gütezahl).
$\eta_{V,T}$	mittlerer Teillastfaktor des Verdichters
$\eta_{V,A}$	Jahresnutzungsgrad des Verdichterantriebs.

Ideale mittlere Arbeitszahl ε_{ideal}

Aus der mittleren Verdampfungs- und der Kondensationstemperatur kann der Carnot'sche Wirkungsgrad berechnet werden. Da über die Betriebszeit gemittelte Temperaturen bei der Berechnung verwendet werden, entspricht ε_{ideal} der mittleren Arbeitszahl.

$$\text{Gl. 8-2} \quad \varepsilon_{ideal} = \frac{1}{\eta_C} = \frac{T_E}{T_C - T_E}$$

mit

η_C	Carnot'scher Wirkungsgrad
----------	---------------------------

Verdampfertemperatur T_E

Bei Verdampfern wird zunächst eine Kälteflüssigkeit im Verdampfer gekühlt, die zu den Kühlregistern im Luftkanal transportiert wird und dort den Luftstrom kühlt. Die Verdampfungstemperatur ergibt sich für indirekte Verdampfer damit zu

$$\text{Gl. 8-3} \quad T_E = T_{KMT,Aus} + \frac{\Delta T_{Ein-Aus,KTM}}{2} - \Delta T_{WÜ} \cdot$$

mit

T_E	Verdampfertemperatur
$\Delta T_{Ein-Aus,KTM}$	Temperaturspreizung des Kälteflüssigkeitsmediums

Die Spreizungen wird entsprechend Gl. 4-15 und Gl. 4-16, die erforderlichen Temperaturdifferenzen zur Wärmeübertragung entsprechend Gl. 4-18 und Gl. 4-17 angesetzt.

Kondensatortemperatur T_C

Die Kondensatortemperatur berechnet sich unter Berücksichtigung der Spreizung und der erforderlichen Temperaturdifferenzen zur Wärmeübertragung zu

$$\text{Gl. 8-4} \quad T_C = T_{U, KK} + \frac{\Delta T_{\text{Ein-Aus,U}}}{2} + \Delta T_{W\ddot{U},1} + \Delta T_{W\ddot{U},2}$$

mit

T_C Kondensatortemperatur

Bei der Ermittlung der Temperaturdifferenzen $\Delta T_{W\ddot{U}}$ im Kondensator ist zu beachten, dass die Wärmeübertragung an das gasförmige Kältemittel erfolgt.

Umgebungstemperatur $T_{U, KK}$

Die Umgebungstemperatur $T_{U, KK}$ entspricht für den hier angenommenen Fall des luftgekühlten Kondensators (trockenes Rückkühlwerk, trockener Kühlturm) der Außenlufttemperatur.

$$T_{U, KK} = T_A$$

Analog zum Verdampfer müssen nun die mittleren Temperaturen berechnet werden. Hierzu werden die Spreizungen entsprechend Gl. 4-15 und Gl. 4-16 verwendet. Für die erforderlichen Temperaturdifferenzen zur Wärmeübertragung werden die Mitteltemperaturen entsprechend Gl. 4-18 und Gl. 4-17 angesetzt.

Exergetischer Wirkungsgrad η_{ex}

Der exergetische Wirkungsgrad beschreibt die Abweichung des realen vom idealen Prozess. Er wird auch als Carnot'sche Gütezahl bezeichnet [Recknagel 01/02].

$$\text{Gl. 8-5} \quad \eta_{ex} = \frac{\mathcal{E}_{real}}{\mathcal{E}_{ideal}}$$

mit

\mathcal{E}_{real} unter realen Bedingungen erzielbare Arbeitszahl

Die im Vollastbetrieb unter realen Bedingungen erreichte Leistungszahl berechnet sich somit zu:

$$\text{Gl. 8-6} \quad \mathcal{E}_{real} = \frac{\eta_{ex}}{\eta_C} = \eta_{ex} \cdot \frac{T_E}{T_C - T_E} .$$

Der exergetische Wirkungsgrad (Carnot'sche Gütezahl) von Kälteanlagen liegt nach [Recknagel 01/02] zwischen 0,5 und 0,6. Für die weiteren Berechnungen wird der exergetische Wirkungsgrad mit 0,5 angesetzt.

Verdichter-Teillastwirkungsgrad $\eta_{V,T}$

Neben dieser Temperaturabhängigkeit der Arbeitszahl wird der Stromverbrauch der Kältemaschine vom Teillastverhalten des Verdichters bestimmt. Abbildung 8-1 zeigt den Verlauf des Teillastwirkungsgrades für drei unterschiedliche Verdichtertypen. Die Wirkungsgrade entsprechen den Angaben aus [Recknagel 94/95]. Für den Turboverdichter ist die im [Recknagel 94/95] berücksichtigte Zunahme der Kälteleistung im Teillastbetrieb herausgerechnet worden, da dies in der Berechnung über die Außentemperaturabhängigkeit der Volllastleistungszahl berücksichtigt wird.

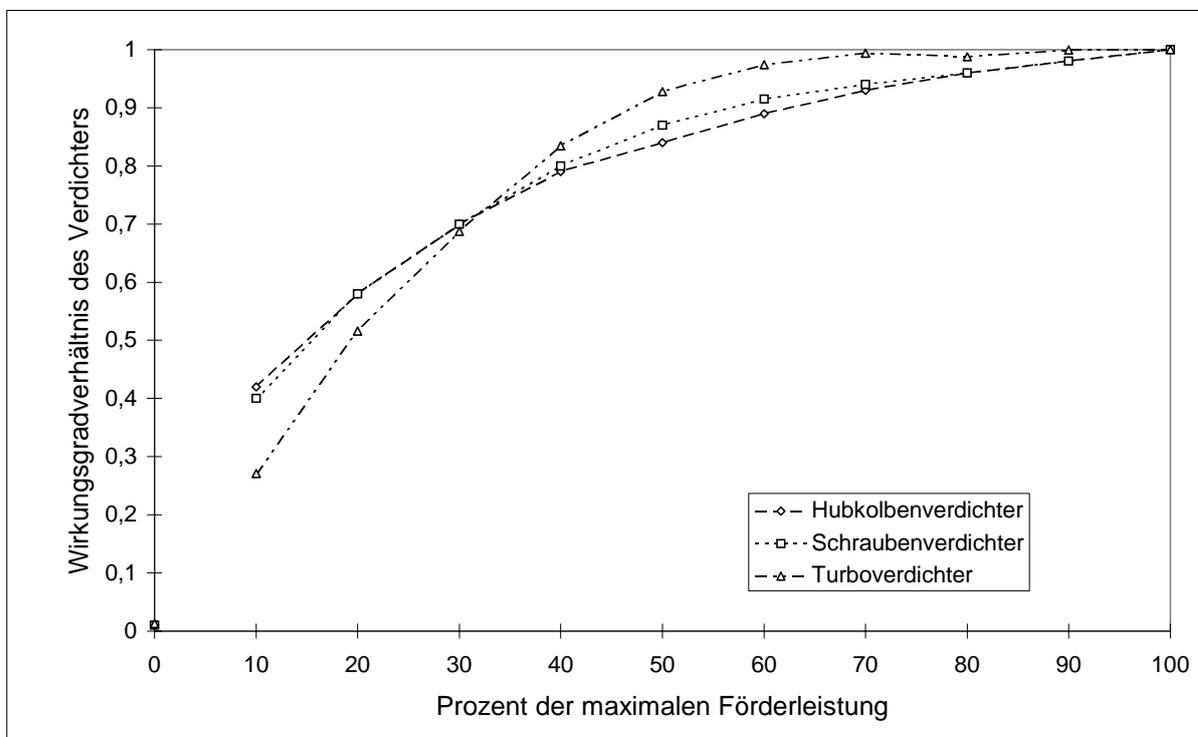


Abbildung 8-1: Teillastverhalten unterschiedlicher Verdichtertypen

Die Teillastwirkungsgrade der einzelnen Verdichter unterscheiden sich nur wenig. In der weiteren Berechnung wird die Charakteristik des Hubkolbenverdichters angenommen.

Um einen Jahresmittelwert für den Verdichterwirkungsgrad zu berechnen, werden die Häufigkeiten unterschiedlicher Teillastzustände nach ARI-550 herangezogen. Dabei wird berücksichtigt, dass die Lastzustände der ARI-550 die Außentemperaturabhängigkeit der Leistungszahl mit beinhalten. Diese werden hier jedoch gesondert berücksichtigt, so dass die Lastzustände für den Verdichter entsprechend korrigiert werden müssen. Diese Lastzustände, Häufigkeiten und Verdichterwirkungsgrade sind in Tabelle 8-1 dargestellt.

Teillast Kältemaschine nach ARI 550	100 %	75 %	50 %	25 %
Häufigkeit nach ARI 550	1 %	42 %	45 %	12 %
Teillast Verdichter	100 %	70 %	40 %	20 %
Teillastfaktor Verdichter*	1	0,93	0,79	0,58
*) Beispiel: Hubkolbenverdichter nach [Recknagel 01/02]				

Tabelle 8-1: Teillastzustände und Häufigkeit für Kältemaschine und Verdichter

Aus der Multiplikation der Teillastfaktoren Verdichter mit der Häufigkeit dieser Zustände nach ARI 550 ergibt sich für das betrachtete Beispiel ein mittlerer Teillastfaktor des Verdichters von

$$\eta_{V,T} = 0,83.$$

Da die Kennlinien der unterschiedlichen Verdichter sich nicht wesentlich unterscheiden, wird dieser Wert als Standardwert verwendet.

Jahresnutzungsgrad Verdichterantriebs $\eta_{V,A}$

Der Jahresnutzungsgrad des Verdichterantriebs kann individuell definiert werden. Sofern er nicht bekannt ist, kann der Standardwert verwendet werden. Er entspricht dem Jahresnutzungsgrad eines Elektromotors von

$$\eta_{V,A} = 0,9$$

Unter diesen Randbedingungen ergibt sich der in Abbildung 8-2 dargestellte Verlauf der mittleren realen Arbeitszahl in Abhängigkeit von der Außentemperatur.

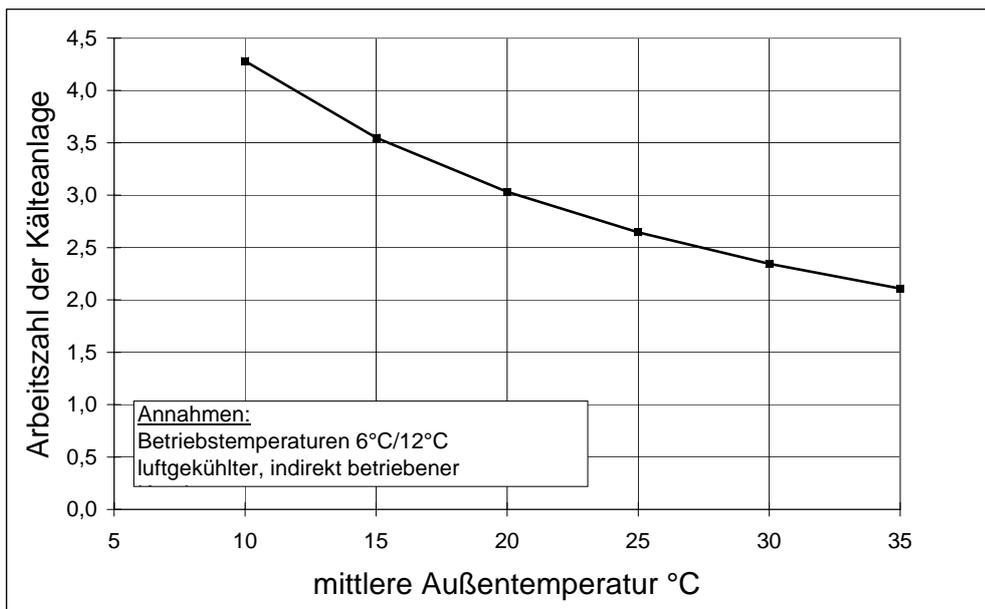


Abbildung 8-2: Temperaturabhängigkeit der mittleren Arbeitszahl der Kältemaschine