

Methodik zur Erfassung, Beurteilung und Optimierung des Elektrizitätsbedarfs von Gebäuden

Modul 1.3 Parameterstudie Kälte

Version:1.1

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	3-932074-71-8
IWU – Bestellnummer	14/05
1. Auflage	6. April 2004
Dokument	M:\Phase 1\Kälte\Bericht\MEG Modul 1.3 - Parameterstudie Kälte 1.1.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	Kurzverfahren.....	3
1.1	Definition der Kennwerte und Begriffsbestimmung	4
1.2	Kältetool der SIA 380/4 (Stand 2002)	7
1.2.1	Maximale Kältelast.....	7
1.2.2	Jahreskältebedarf	8
1.3	Monatsbilanzverfahren	9
1.4	VDI 2078	13
1.4.1	Maximale Kältelast.....	13
1.4.2	Jahreskältebedarf	14
1.5	Klimafläche	15
1.5.1	Jahreskältebedarf	15
1.5.2	Maximale Raumkühllast.....	17
2	Vergleichsrechnungen	19
2.1	Randbedingungen der Berechnung.....	19
2.1.1	Geometrie	19
2.1.2	Bauteilaufbau	20
2.1.3	Nutzung.....	22
2.1.4	Luftwechsel	23
2.1.5	Klima	24
2.1.6	Sonstiges	24
2.2	Hinweise zur Modellbildung.....	24
2.2.1	Klimafläche	24
2.2.2	VDI 2078	24
2.2.3	Kältetool der SIA 380/4.....	25
2.2.4	Monatsbilanzverfahren / Elsberger.....	26
2.3	Basisvariante	26
2.3.1	Vergleich SIA Kältetool mit TAS-Simulationen	28
2.4	Parameterstudie	30
2.4.1	Fensterflächenanteil	30
2.4.2	Höhe der Internen Wärmequellen	33
2.4.3	U-Wert der Außenfassade	35
2.4.4	Luftwechsel während der Nutzungszeit.....	38

3	Bewertung der Kurzverfahren.....	41
4	Zusammenfassung	47
5	Literaturverzeichnis	49

1 Kurzverfahren

Bei der Beurteilung des Stromverbrauchs von Gebäuden muss auch der Jahreskältebedarf berücksichtigt werden, sofern eine Klimaanlage mit entsprechenden Luftbehandlungsfunktionen vorhanden ist. Ziel dieses Moduls ist es, ein Berechnungsverfahren zu ermitteln, über das der Jahreskältebedarf und die maximale Kältelast eines Raumes oder Gebäudebereiches abgeschätzt werden kann. Der Eingabeaufwand soll dabei begrenzt sein und das Verfahren in die Excel-Arbeitshilfe integriert werden können.

Traditionell wird der Jahreskältebedarf über dynamische Simulationsrechnungen ermittelt. Unter Berücksichtigung der Geometrie, der Bauteilaufbauten, der Nutzung und der HLK-Technik wird hierbei für jede Stunde des Jahres unter Verwendung von stündlichen Klimadaten die Energiebilanz gelöst und so das Temperaturverhalten und der erforderliche Heiz- oder Kühlenergiebedarf berechnet. Der Aufwand für die Berechnung ist aufgrund der großen Differenziertheit des Gebäudemodells groß. Für die hier vorliegende Aufgabenstellung sind dynamische Simulationsverfahren deswegen nicht geeignet.

Neben dynamischen Simulationsrechnungen existieren Kurzverfahren, mit denen das sommerliche Temperaturverhalten und der Kältebedarf abgeschätzt werden kann. Die Rechengenauigkeit und die Flexibilität sind hierbei zum Teil eingeschränkt. Diese Kurzverfahren scheinen für die vorliegende Aufgabenstellung geeignet.

Da mehrere Kurzverfahren existieren, wird in diesem Abschnitt kein neues Verfahren entwickelt. Ziel ist es die Kurzverfahren auf ihre Eignung hin zu untersuchen. Bewertet werden dabei

- der Eingabeaufwand
- die Rechengenauigkeit
- die Flexibilität bei der Definition unterschiedlicher Nutzungssituationen und
- die Umsetzbarkeit in der Excel-Arbeitshilfe.

Nach einer kurzen Begriffsbestimmung in Bezug auf die Zielgrößen werden im Folgenden die untersuchten Kurzverfahren zunächst vorgestellt und der prinzipielle Lösungsansatz erläutert, mit dem sie den Jahreskältebedarf und die maximale Kältelast berechnen. Dann wird die Rechengenauigkeit durch Vergleich mit dynamischen Simulationsrechnungen bewertet. Anschließend wird eine Bewertung der Verfahren anhand der oben angegebenen Kriterien vorgenommen um dasjenige Kurzverfahren auszuwählen, das in Modul 2.3 Klimakälte des Projekts MEG als Standardberechnungsverfahren aufbereitet wird.

1.1 Definition der Kennwerte und Begriffsbestimmung

Wie bereits erwähnt, ist es Aufgabe der Kurzverfahren, die beiden Kenngrößen Jahreskältebedarf und maximale Kältelast für einen Raum oder Gebäudebereich zu berechnen. Da die Kenngrößen von der allgemein üblichen Definition abweichen, werden diese im Folgenden kurz definiert.

Die Unterschiede in der Berechnung ergeben sich insbesondere zur VDI 2078 „Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume“. Sie betreffen die Behandlung des Außenluftwechsels. Die VDI 2078 geht davon aus, dass der über die Lüftungsanlage eingebrachte Außenluftvolumenstrom mit Raumtemperatur eingeblasen wird. Aus der Luftzufuhr resultiert also keine Wärmezu- oder -abfuhr. Wirksam im Raum ist nur der Luftwechsel über Undichtigkeiten und Fenster, wobei der Fensterluftwechsel in der Regel zu Null angenommen wird. Die unter diesen Randbedingungen berechneten Leistungswerte werden in der VDI 2078 als Raumkühllast bezeichnet.

Probleme ergeben sich insbesondere bei der Berechnung des Jahreskältebedarfs. Wird der Außenluftwechsel in der gleichen Weise berücksichtigt, ergeben sich unrealistisch hohe Zahlenwerte, da die Möglichkeit der freien Kühlung (Zufuhr von kühler Außenluft unter Raumtemperatur) nicht berücksichtigt wird.

Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Studie angenommen, dass auch der über die Lüftungsanlage geförderte Luftwechsel dem Raum mit Außenlufttemperatur zugeführt wird. Die Heiz- bzw. Kühllasten zur Angleichung der Zuluft an die Raumlufttemperatur werden somit im Raum selber wirksam. Bildlich gesprochen ist in dem Raum somit ein Umluftsystem zur Beheizung und Kühlung vorgesehen (siehe Abbildung 1-1).

Die Auswirkungen auf den maximalen Kältebedarf sind gering (siehe Abbildung 2-11). Trotzdem wird in Abgrenzung zur VDI 2078 die Bezeichnung maximale Kältelast anstatt maximale Raumkühllast (VDI 2078) verwendet. Der Verzicht auf den Zusatz „Raum“ deutet darauf hin, dass in der Kältelast auch ein Kühllastanteil enthalten ist, der in der Kältezentrale anfallen kann. Die maximale Kältelast $\dot{Q}_{K,max}$ ergibt sich als Maximalwert der Summe der in Abbildung 1-1 grafisch dargestellten Wärmeströme:

$$Gl. 1-1 \quad -\dot{Q}_{K,max} = [\dot{Q}_S + \dot{Q}_P + \dot{Q}_B + \dot{Q}_A + \dot{Q}_{SP} + \dot{Q}_{T,AW} + \dot{Q}_{T,FE} + \dot{Q}_{L,FU} + \dot{Q}_{L,LA}]_{max}$$

mit

$\dot{Q}_{K,max}$	maximale Kältelast
\dot{Q}_S	durch solare Einträge zugeführter Wärmestrom in Watt
\dot{Q}_P	durch Personenabwärme zugeführter Wärmestrom in Watt
\dot{Q}_B	durch Beleuchtungsabwärme zugeführter Wärmestrom in Watt
\dot{Q}_A	durch Arbeitshilfen zugeführter Wärmestrom in Watt
\dot{Q}_{SP}	in die Speichermassen ein- oder ausgespeicherter Wärmestrom in Watt
$\dot{Q}_{T,AW}$	Transmissionswärmestrom über opake Bauteile (hier Außenwand) in Watt
$\dot{Q}_{T,FE}$	Transmissionswärmestrom über Fenster in Watt

In Abbildung 1-1 sind folgende weitere Größen enthalten:

T_A Außenlufttemperatur in °C

T_R Raumlufttemperatur in °C

\dot{m}_{zu} Zuluftmassenstrom in kg/s

\dot{m}_{ab} Abluftmassenstrom in kg/s

Darüber hinaus werden im Weiteren folgenden Summengrößen verwendet.

$$Gl. 1-4 \quad \dot{Q}_I = \dot{Q}_P + \dot{Q}_B + \dot{Q}_A$$

$$Gl. 1-5 \quad \dot{Q}_T = \dot{Q}_{T,AW} + \dot{Q}_{T,FE}$$

$$Gl. 1-6 \quad \dot{Q}_L = \dot{Q}_{L,FU} + \dot{Q}_{L,LA}$$

mit

\dot{Q}_I Wärmestrom aus internen Wärmequellen in Watt

\dot{Q}_T Transmissionswärmestrom in Watt

\dot{Q}_L Lüftungswärmestrom in Watt

1.2 Kältetool der SIA 380/4 (Stand 2002)

In die Arbeitshilfe zur SIA 380/4 ist ein Kurzverfahren integriert, mit dem für einen Raum die maximale Kältelast und der Jahreskältebedarf in Abhängigkeit unterschiedlicher Gebäudeparametern berechnet werden kann [Seidinger 2002-1], [Seidinger 2002-2]. Dieses wird als Kältetool bezeichnet.

Das Kurzverfahren basiert auf einer sehr umfangreichen Parameterstudie. Aus den Simulationsergebnissen werden funktionale Zusammenhänge zwischen den individuellen Gebäudeparametern und der max. Kältelast bzw. dem Jahreskältebedarf abgeleitet. Diese Zusammenhänge werden in Form von Regressionsgleichungen angegeben.

Im Rahmen der dem Verfahren zugrunde liegenden Parameterstudie werden für einen Musterraum die Kühlleistung und der Jahreskältebedarf bei unterschiedlichen Parameterausprägungen berechnet. Betrachtet werden folgende Parameter:

- verschiedene Standardnutzungen
- verschiedene Klima-Standorte der Schweiz
- Orientierung (N,E,S,W)
- Gebäudemasse (schwer, mittelschwer, leicht)
- Fassadenvarianten (Fenster-/Bodenflächenverhältnis)
- Beschattungseinrichtungen, Tageslichtsteuerungen.

1.2.1 Maximale Kältelast

In den Simulationsrechnungen wird ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Wärmelastspitze und der maximalen Kältelast gefunden. Aus den Ergebnissen wird eine funktionale Beziehung abgeleitet, die in Form von 14 Standardgeraden angegeben wird. Für die unterschiedlichen Berechnungsfälle wird angegeben, mit welcher der 14 Standardgeraden zu rechnen ist. Unterschieden wird dabei nach

- der Nutzung
- der Bauschwere und
- der Orientierung.

Der Berechnungsvorgang im Kältetool läuft derart, dass für die Ermittlung der maximalen Kältelast zunächst das Tagesprofil der Wärmelast (unverzögert) für den Raum aufgestellt und die Wärmelastspitze ermittelt wird. Über die entsprechende Standardgerade wird dann die maximale Raumkühlleistung ermittelt.

Die berechnete maximale Kältelast bezieht sich nur auf den Raum, d. h. es wird nur der Luftwechsel durch Undichtheiten berücksichtigt ($0,6 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$). Angenommen ist dabei eine maximale Raumtemperatur von 26°C . Die Kälteanlage läuft 24 Stunden. Der Sollwert wird in der Nacht von 26°C auf 21°C reduziert. Bei der Kältelast handelt es sich um eine konvektive Last im eingeschwungenen Zustand.

1.2.2 Jahreskältebedarf

Ausgangspunkt zur Berechnung des Jahreskältebedarfs ist die stationäre Energiebilanz des betrachteten Raumes über einen Tag. Damit die Tageenergiebilanz ausgeglichen ist, muss dem Raum über die HLK-Anlage Wärme (im Winter Heizwärme Q_H und im Sommer Kälte Q_K) zugeführt werden.

$$\text{Gl. 1-7} \quad Q_L + Q_T + Q_K = Q_H + Q_S + Q_I$$

Der gesamte Kältebedarf ergibt sich als Jahressumme aus dem Tageskältebedarf.

$$\text{Gl. 1-8} \quad Q_{K,a} = \sum_{d=1}^{365} Q_{K,d}$$

mit

$Q_{K,a}$ Kältebedarf in kWh pro Jahr ohne Berücksichtigung von Wochenende und Feiertagen

Wochenenden und Feiertage werden berücksichtigt, indem der Kältebedarf mit dem Jahresnutzungszeit-Verhältnis (Nutzungstagen pro Jahr/365) multipliziert wird.

$$\text{Gl. 1-9} \quad Q_{KB} = Q_{K,a} \frac{d_a}{365}$$

mit

d_a Nutzungstage pro Jahr

Q_{KB} Jahreskältebedarf in kWh pro Jahr

Quantifiziert werden die Verluste (Transmission, Lüftung) und solaren Gewinne über eine Linearisierung der Summenhäufigkeitskurven für die Tagesmittelwerte der Außenlufttemperatur und die solaren Einträge.

1.3 Monatsbilanzverfahren

Das Monatsbilanzverfahren wurde von Herrn Elsberger im Rahmen seiner Promotion am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München entwickelt [Elsberger 2001]. Betreut wurde die Arbeit von Prof. Rouvel und Prof. Hausladen. Das Verfahren basiert auf dem Monatsbilanzverfahren der EN 832. Die EN 832 ist die europäische Vorgabe für die Berechnung des Heizwärmebedarfs von Gebäuden. Umgesetzt ist diese in Deutschland in der DIN 4108 Teil 6. Das Berechnungsverfahren der DIN 4108 Teil 6 wird auch bei der Ermittlung des Primärenergiekennwertes in der Energieeinsparverordnung verwendet.

Eine wesentliche Größe in dem Monatsbilanzverfahren von Elsberger sind die nicht nutzbaren Gewinne. Diese werden wie folgt bestimmt

$$\text{Gl. 1-10} \quad Q_{NN} = (1 - \eta) (Q_{sol} + Q_{int}).$$

mit

Q_{NN} nicht nutzbare Gewinne in kWh

η Ausnutzungsgrad nach EN 832

Q_{sol} solare Einträge in kWh

Q_{int} interne Wärmeeinträge in kWh

Der Ausnutzungsgrad η wird dabei entsprechend der EN 832 berechnet.

Sind die nichtnutzbaren Gewinne für jeden Monat des Jahres bekannt, wird über die Division durch die Betriebszeit der Kälteanlage eine mittlere Kühllast für den Monat i ermittelt

$$\text{Gl. 1-11} \quad P_{K,i} = \frac{Q_{NN,i}}{t_{B,i}}$$

mit

i Laufindex über die Monate des Jahres

$P_{K,i}$ mittlere Kühllast im Monat i in kW

$t_{B,i}$ Betriebszeit im Monat i in h

Die mittleren Kühllasten je Monat werden über die Temperaturdifferenz (innen-außen) aufgetragen und die unterschiedlichen Punkte durch eine Regressionsgerade angenähert. Diese Regressionsgerade beschreibt die Kühllastcharakteristik des Raumes in Abhängigkeit von der Außentemperatur (siehe Abbildung 1-2 obere Hälfte / Kurve mit Quadratsymbolen). Das Gleiche wird für den Heizfall gemacht (obere Hälfte / Kurve mit Kreuzsymbolen).

Aus den Schnittpunkten der Kennlinien (Heizen und Kühlen) mit der x-Achse werden unterschiedliche Temperaturbereiche identifiziert, die in der späteren Berechnung unterschieden werden. Die Bereiche sind wie folgt definiert:

- Bereich III: Es existiert nur ein Heizwärmebedarf
- Bereich II: Bereich der Außentemperatur, bei dem sowohl ein Heiz- als auch ein Kältebedarf entstehen kann

- Bereich I: Es existiert nur ein Kältebedarf

Der Bereich I wird noch einmal untergliedert und zwar in

- Bereich Ib: Es existiert nur ein Kältebedarf. Die Außentemperaturen sind jedoch gering, so dass die Zuluft vor dem einbringen in den Raum in der Regel vorerwärmt werden muss
- Bereich Ia: Es existiert nur ein Kältebedarf. Die Außentemperaturen sind jedoch hoch, so dass die Zuluft in der Regel gekühlt werden muss.

Grenzwert der Unterteilung ist die mit der Häufigkeit gewichtete mittlere Außentemperatur des Bereiches I ohne Unterteilung.

Das Wetter wird in stündlicher Auflösung betrachtet. Für jeden Monat wird die Summenhäufigkeit der Außentemperatur ermittelt (siehe Abbildung 1-2 untere Hälfte / Kurve mit Dreiecksymbolen). Der Kurvenverlauf der Häufigkeitsverteilung kann gut über eine logistische Wachstumsfunktion beschrieben werden. Bekannt sein muss dafür für jeden Monat die mittlere Außenlufttemperatur und die Standardabweichung.

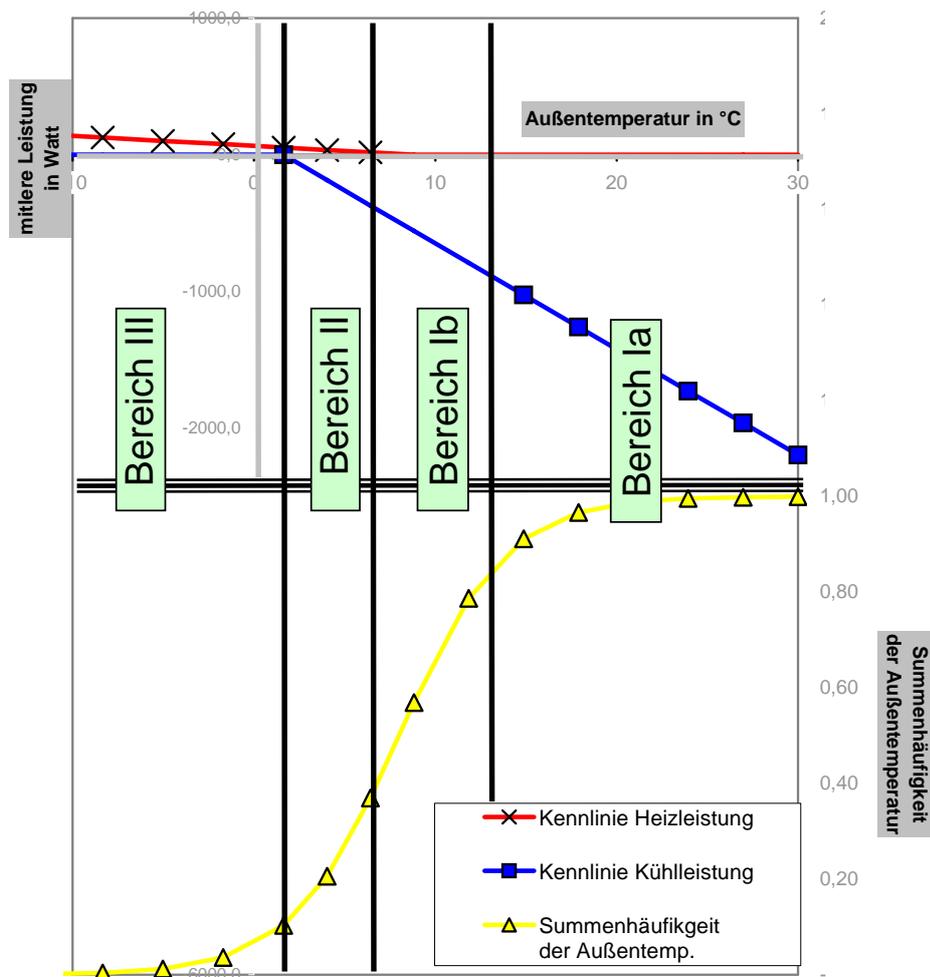


Abbildung 1-2: Summenhäufigkeitskurve der Außentemperatur (unten) und Heiz- bzw. Kühlleistung (oben) in Abhängigkeit von der Außentemperatur

Für die unterschiedlichen Bereiche I bis III werden jeweils die mittlere Außentemperatur $T_{K,i}$ und die mittlere Häufigkeit $H_{K,i}$ bestimmt.

Durch die Kombination mit der Kühllastcharakteristik kann für jeden Bereich b der monatliche Kältebedarf ermittelt werden.

$$\text{Gl. 1-12} \quad Q_{K,b,i} = P_K(T_{K,b,i}) H_{K,b,i}$$

Der monatliche Kältebedarf ergibt sich aus der Summe über die Bereiche

$$\text{Gl. 1-13} \quad Q_{K,i} = \sum_b Q_{K,b,i} \cdot$$

In [Elsberger 2001] wird nun durch weitere Differenzierung der Kältebedarf in der Klimazentrale berechnet. Das Verfahren ermöglicht zudem die Berechnung des Nutzenergiebedarfs zur Be- und Entfeuchtung sowie die Berücksichtigung von statischen Kühlsystemen im Raum.

In der hier durchgeführten Untersuchung wird die nachgeschaltete Anlagentechnik jedoch nicht betrachtet. Grundlage zur Ermittlung des Jahreskältebedarfs ist damit Gl. 1-13.

$$\text{Gl. 1-14} \quad Q_{KB} = \sum_i Q_{K,i} \cdot$$

Maximale Kältelast

Für die Berechnung der maximalen Kältelast wird in [Rouvel 2003] ein Vorschlag gemacht, der im Folgenden verwendet wird. Die maximale Kältelast berechnet sich dabei nach folgender Gleichung:

$$\text{Gl. 1-15} \quad P_{K,\max} = P_0 + F_D \frac{\text{Max}_{i=1,12}[P_{K,i}]}{A_{HNF}}$$

mit

P_0 Grundbedarf in W/m^2 (in der Regel 10 W/m^2)

F_D Dimensionierungsfaktor

$P_{K,i}$ mittlere Kältelast im Monat i in Watt

A_{HNF} Hauptnutzfläche der betrachteten Zone in m^2

Die maximale Kältelast ergibt sich als Summe aus dem Grundbedarf sowie einem modifizierten Wert der maximalen über den Monat gemittelten Kältelast.

Der Grundbedarf entspricht dabei dem Wärmestrom, der zum Zeitpunkt der Maximallast dem Raum durch den hygienisch erforderlichen Außenluftwechsel zugeführt wird. Als üblicher Wert werden in [Rouvel 2003] 10 W/m^2 angegeben.

Der zweite Summand entspricht einer modifizierten mittleren monatlichen Kältelast. Bezogen wird dieser Wert auf die Hauptnutzfläche. Damit ergibt sich eine flächenspezifische Größe mit der Einheit W/m^2 . Modifiziert wird die mittlere Kältelast mit dem Dimensionierungsfaktor F_D . Dieser berechnet sich nach folgender Formel:

$$\text{Gl. 1-16} \quad F_D = 1,25 \cdot \exp\left(-\frac{\tau_{\text{Kühl}}}{48}\right)$$

$$\text{Gl. 1-17} \quad \tau_{\text{Kühl}} = \frac{C_{\text{wirk}}}{\frac{\text{Max}_{i=1,12}[P_{K,i}]}{\Delta\vartheta_R} + H_i}$$

mit

$\tau_{\text{Kühl}}$ Zeitkonstante unter Berücksichtigung der Raumkühlung in h

C_{wirk} Wirksame Speicherkapazität in Wh/K

H_i spezifische Verluste in W/K

$\Delta\vartheta_R$ Temperaturdifferenz zwischen Sollwert Kühlung und Heizung

Der Dimensionierungsfaktor lässt sich wie folgt interpretieren. Sind der Sollwert für Kühlung und Heizung identisch, ist $\Delta\vartheta_R = 0$. Damit wird auch $\tau_{\text{Kühl}}$ und der Exponent gleich Null. Da e^0 den Wert eins ergibt, nimmt F_D in diesem Fall den Wert der Konstanten von 1,25 an. Das bedeutet, dass die maximale Kältelast um den Faktor 1,25 größer ist als die über den Monat gemittelte Kältelast.

Liegt der Sollwert für die Kühlung über dem Sollwert für Heizung reduziert sich der Faktor zwischen maximaler Kältelast und mittlerer Kältelast (bei Sollwert Kühlung = Sollwert Heizung). Die Abnahme von F_D ist dabei abhängig von der Zeitkonstanten $\tau_{\text{Kühl}}$. Je höher die Zeitkonstante desto geringer ist der Dimensionierungsfaktor F_D und damit die maximale Kältelast.

1.4 VDI 2078

Die VDI 2078 gibt Vorschriften zur Berechnung der Raumkühllast klimatisierter Räume und der Gebäudekühllast. Für die hier behandelte Fragestellung ist sie zur Berechnung der maximalen Kältelast geeignet. Hierzu bietet sie ein Kurz- und ein EDV-Berechnungsverfahren an.

1.4.1 Maximale Kältelast

Kurzverfahren

Das Kurzverfahren bestimmt die Raum- oder Gebäudekühllast für fest vorgegebene Randbedingungen und zu einem bestimmten Zeitpunkt. Zur Bestimmung der maximalen Kühllast muss der Zeitpunkt abgeschätzt werden, an dem der Maximalwert erwartet wird (sofern dieser nicht eindeutig vorhergesagt werden kann, muss die Berechnung für mehrere Zeitpunkte durchgeführt werden). Die jeweilige Kühllast ergibt sich als Summe aller zum Berechnungszeitpunkt auftretenden äußeren und inneren Raumbelastungen. Die dämpfende Wirkung der Speichermassen wird berücksichtigt, indem die Raumbelastungen mit so genannten „Kühllastfaktoren“ multipliziert werden. Die Kühllastfaktoren bedeuten den momentanen konvektiven Wärmeeintrag an die Raumluft von internen und externen Wärmequellen aufgrund direkter konvektiver Wärmebelastung sowie zeitverzögerter und gedämpfter Strahlungsbelastung, bezogen auf die maximale Wärmeabgabe der jeweiligen Wärmequelle (solare Einträge, Mensch, Beleuchtung und Maschinen). Sie sind demnach normierte Kühllasten. Die entsprechenden konvektiv wirksamen Kühllastanteile berechnen sich nach folgender Grundgleichung:

$$\text{Gl. 1-18} \quad \dot{Q}_{K,i} = \dot{W}B_{i,\max} \cdot S_i$$

mit

$\dot{Q}_{K,i}$ konvektiv wirksame Kühllast in Watt

$\dot{W}B_{i,\max}$ maximale Wärmeabgabe der Wärmequelle in Watt

S_i Kühllastfaktor

Die Kühllastfaktoren beschreiben den Teil der gesamten Wärmeabgabe, der dem Raum als konvektive Wärme zugeführt wird. Nur dieser stellt für den Raum zum Berechnungszeitpunkt eine Wärmelast dar. Der verbleibende Teil kann in den Massen des Raumes zwischengespeichert werden.

Der Kühllastfaktor hängt ab von

- dem Zeitpunkt, zu dem die Kühllast ermittelt wird
- der Bauschwere des Raums
- der Betriebszeit der Wärmequelle und
- dem Konvektivanteil bei der Wärmeabgabe der Wärmequelle.

Diese Kühllastfaktoren sind in dynamischen Simulationsläufen vorbestimmt und tabelliert. Sie gelten exakt nur für die Randbedingungen, für die sie berechnet wurden, was die Universalität dieses Verfahrens einschränkt. Für die Ermittlung der Kühllastfaktoren wurden folgende Annahmen getroffen:

- konstante Raumtemperatur
- periodische innere und äußere Belastungen
- eingeschwungener Zustand
- 24 stündiger Anlagenbetrieb
- konstanter Sonnenschutzfaktor (kein wandernder Schatten).

EDV-Verfahren

Mit dem EDV-Verfahren ist die Bestimmung der Raumkühllast unter variablen und damit realistischeren Randbedingungen möglich. Für sechs Aktionsgrößen wird über Gewichtsfaktoren die jeweils sich ergebende Reaktionsgröße, d. h. konvektive Reaktionswärmelast bestimmt. Die Gewichtsfaktoren sind für vier unterschiedliche Schwereklassen in normierter Form tabelliert. Nach einer Denormierung kann mit Hilfe des Faltungsprinzips, in Form der sog. rekursiven Filter, die jeweilige konvektive Reaktionswärmelast bestimmt werden. Die rekursiven Filter haben den Vorteil, dass weniger Summanden bei der Faltungssumme berücksichtigt werden müssen. Aus der Summe der sechs konvektiven Reaktionswärmelasten, dem jeweiligen Durchgriff und dem Luftwert wird die aktuelle Kühllast bestimmt. Das EDV-Verfahren hat den Vorteil, dass neben dem aktuellen Tagesgang der Kühllast auch die Raumtemperatur berechnet werden kann. Dies eröffnet die Möglichkeit, die Entwicklung der Raumtemperatur bei vorgegebener maximaler Kühllast oder die Raumtemperatur außerhalb der Betriebszeit der Anlage zu bestimmen.

Das EDV-Verfahren entspricht bezüglich der Flexibilität weitgehend dynamischen Simulationsrechnungen. Eingeschränkt wird die Flexibilität nur durch die für Standardräume und Standardkonstruktionen ermittelten Gewichtsfaktoren. Allerdings gleicht der Eingabeaufwand auch dem von dynamischen Simulationsrechnungen. Für die vorliegende Fragestellung ist das EDV-Verfahren damit nicht geeignet.

1.4.2 Jahreskältebedarf

Eine Berechnung des Jahreskältebedarfs ist mit dem Kurzverfahren der VDI 2078 nicht möglich.

1.5 Klimafläche

1.5.1 Jahreskältebedarf

Der wesentliche Ansatz dieses Verfahrens besteht darin, die Leerlauftemperatur für den freischwingenden Zustand (kein Heizen oder Kühlen) für einen Raum oder einen Gebäudebereich zu berechnen [Burmeister 1995], [Keller 1998]. Ermittelt wird diese durch die Lösung der Fourierschen Differentialgleichung. Nach dem zugrunde liegenden Ansatz ist es die Rolle der Haustechnik, die Leerlauftemperatur derart zu korrigieren, dass sie in dem gewünschten Komfortband bleibt bzw. sie dorthin zurückzubringen. Auf diese Weise kann der Kälte- und der Heizwärmebedarf berechnet werden.

Die Leerlauftemperatur wird durch die Lösung der Differentialgleichung der Wärmeleitung ermittelt. Die Speichermasse eines Raumes wird dabei zu einem Bauteil zusammengefasst. Für die Annahme von dünnen Speicherschichten kann von einer Punktkapazität ausgegangen werden, die eine einheitliche Temperatur aufweist. Die Leerlauftemperatur entspricht in dem Fall der Speichermassentemperatur. Der zeitliche Verlauf der Leerlauftemperatur ergibt sich für diese Annahmen aus der Beziehung

$$\text{Gl. 1-19} \quad m c_p \frac{dT_{free}}{dt} = \dot{Q}_S + \dot{Q}_I - \dot{Q}_T - \dot{Q}_L$$

mit

T_{free} Leerlauftemperatur (freischwingender Zustand)

Aus diesem Zusammenhang kann die Leerlauftemperatur berechnet werden. Die Leerlauftemperatur ist bei gegebenen Klimadaten nur noch abhängig von der Zeitkonstante und dem Gewinn/Verlust Verhältnis.

Für den in der Realität auftretenden Fall der endlichen Schichtdicken kann ebenfalls eine Lösung der Differentialgleichung gefunden werden. Berücksichtigt wird in diesem Fall, dass nicht die gesamte Speichermasse thermisch aktiv ist, was sich auf die Zeitkonstante auswirkt. Die Beeinflussung der Zeitkonstante wird durch den so genannten Kopplungsfaktor ausgedrückt.

Der Kopplungsfaktor β beschreibt das folgende Verhältnis

$$\beta = \frac{\text{Wärmewiderstand von Raumluft nach außen}}{\text{Wärmewiderstand von Raumluft in Speichermasse}}$$

Die Kopplungsfaktoren geben an, welcher Anteil der freien Wärme von den Speichermassen aufgenommen wird (Anteil hoch, wenn $\beta \gg 1$), bzw. welcher Anteil nach außen abfließt (Anteil hoch, wenn $\beta \ll 1$). Die Eindringtiefe der Temperaturamplitude in das Bauteil wird für eine Periodendauer von 24 Stunden bestimmt.

Die Lösung der Differentialgleichungen zeigt, dass die Leerlauftemperatur für den Fall der Speichermassen mit endlicher Dicke von folgenden Faktoren abhängt:

- Klimafunktion ϕ
- Gewinn/Verlust Verhältnis γ
- Zeitkonstante τ (inkl. Kopplungsfaktor β).

Dieser Zusammenhang wird in einer so genannten Klimafäche dargestellt. Angegeben werden dabei verallgemeinerte Kühlgradtage [K s], die quantifizieren, um welchen Betrag und wie lange die Leerlaufstemperatur über der Solltemperatur liegt:

$$Gl. 1-20 \quad \Omega_C(\tau_{eff}, \gamma) = \int_{t_A}^{t_B} (T_{free} - T_{max}) dt$$

mit

$\Omega_C(\tau_{eff}, \gamma)$ verallgemeinerte Kühlgradtage in Kh

τ_{eff} effektive Zeitkonstante unter Berücksichtigung des Kopplungsfaktors in h

γ Gewinn/Verlust Verhältnis

t_A Anfangszeitpunkt

t_B Endzeitpunkt

T_{max} maximal zulässige Raumtemperatur in °C

Der Jahreskühlenergiebedarf ergibt sich für den Fall der kontinuierlichen Energiezufuhr nun aus der Beziehung:

$$Gl. 1-21 \quad Q_{KB} = A_{ext} H \Omega_C(\tau, \gamma) .$$

mit

A_{ext} Summe der Außenflächen des Raumes in m²

H verallgemeinerter Verlustfaktor (spezifischer Wärmeverlust nach DIN 4108, Teil 6) für Transmission und Lüftung in W/(m²_{ext} K)

Bei intermittierender Energiezufuhr ergibt sich der Jahreskühlenergiebedarf durch Aufsummieren der einzelnen Teilbeträge.

Bei der Berechnung der Klimafäche werden eine Reihe von Annahmen getroffen, die die Flexibilität des Berechnungsansatzes einschränken:

- Solltemperaturen für Heizung und Kühlung
- Nachtabsenkung
- Klimastation
- Himmelsrichtung der Fenster
- Sonnenschutz
- Höhe des Nachtluftwechsels

Um dieses Verfahren dennoch in möglichst vielen Fällen anwenden zu können, werden für einen Standort eine größere Anzahl unterschiedlicher Klimafächen berechnet.

1.5.2 Maximale Raumkühllast

Die maximale Kühlleistung kann ebenfalls aus der oben ausgeführten Beziehung berechnet werden. Ähnlich wie bei der Klimafläche kann eine Größe $\Pi(\tau, \gamma)$ definiert werden, die als eine Auslegungstemperaturdifferenz interpretiert werden kann. Der Verlauf von Π kann nun ebenfalls als Fläche in Abhängigkeit von τ und γ dargestellt werden. Die maximale Leistung ergibt sich dann aus der Beziehung:

$$\text{Gl. 1-22} \quad P_{\max}(\tau, \gamma) = H \cdot \Pi(\tau, \gamma)$$

mit

P_{\max} maximale spezifische Leistung (Heizung oder Kühlung) in W/m^2

$\Pi(\tau, \gamma)$ zu beachtende Auslegungstemperaturdifferenz in K

2 Vergleichsrechnungen

Um die Genauigkeit der unterschiedlichen Kurzverfahren zu bewerten, werden sie mit den Ergebnissen aus dynamischen Simulationsrechnungen verglichen. Die dynamischen Simulationsrechnungen werden mit dem Programm TAS durchgeführt. Die in der Gebäudesimulation verwendeten physikalischen Modelle sind in [Kamps 1996] beschrieben. Die Validität wurde in [Knissel 1998] durch Vergleich mit Messdaten bestätigt.

Differenzen zwischen Simulation und Kurzverfahren können begründet sein durch:

- Das Berechnungsverfahren: Das Kurzverfahren führt bei sonst exakt gleichen Randbedingungen zu unterschiedlichen Ergebnissen.
- Die Modellbildung: Die tatsächlichen Randbedingungen können durch die im Kurzverfahren zur Verfügung stehenden Parameter nur angenähert werden.

Beide Fehlerquellen bedingen eine Abweichung von den dynamisch simulierten Ergebnissen. Da für die praktische Anwendung nur die Summe aus beiden Fehlern interessiert, wird auch in der vorliegenden Untersuchung keine Differenzierung vorgenommen. Die Untersuchung ist so aufgebaut, dass möglichst realistische Betriebsituationen mit den Simulationen vorgegeben werden und diese durch die Kurzverfahren nachgerechnet werden.

Berechnet wird die maximale Kältelast und der Jahreskältebedarf für ein Einzelbüro/Gruppenbüro. Variiert werden die folgenden Parameter

1. Fensterflächenanteil der Außenfassade
2. Höhe der internen Wärmequellen
3. Luftwechsel
4. Wärmeschutz

2.1 Randbedingungen der Berechnung

Im folgenden werden die Randbedingungen einer so genannten Basisvariante beschrieben, die Ausgangsbasis der Parametervariation ist. Da die Basisvariante einen nennenswerten Kältebedarf aufweisen muss, wird eine energetisch nicht vorbildliche Ausführung gewählt. Die Basisvariante ist somit nicht als Planungsempfehlung zu verstehen, sondern dient ausschließlich dem Test der unterschiedlichen Kälteverfahren.

2.1.1 Geometrie

Es wird angenommen, dass das Einzelbüro nur an einer langen Seite an die Außenluft grenzt und ansonsten von Nebenräumen umgeben ist. Die geometrischen Abmessungen sind in Abbildung 2-1 dargestellt.

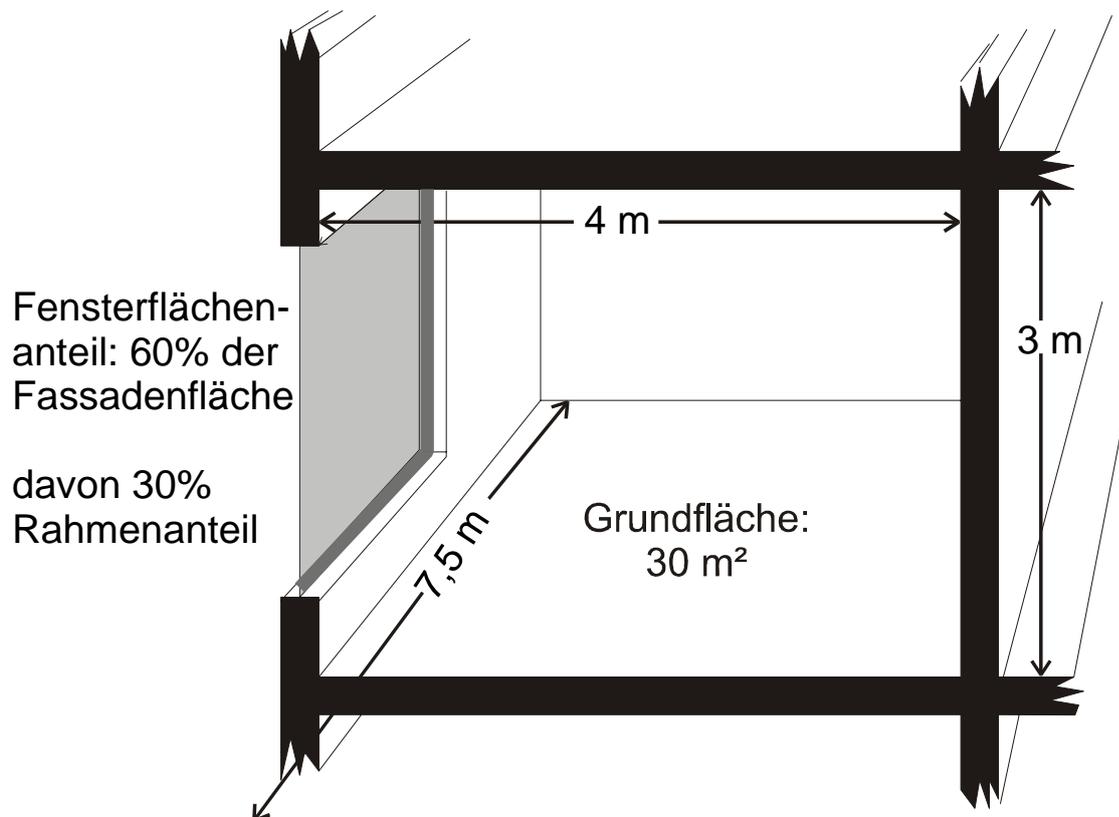


Abbildung 2-1: Geometrische Abmessungen des untersuchten Beispielraumes

Der Fensterflächenanteil wird bezogen auf die Innenseite der Außenwand berechnet. Er beträgt 60 %. Die Fenster sind mit einem außen liegender Sonnenschutz ausgerüstet. Gewählt wurde eine Stoffmarkise, die oben und seitlich anliegt. Nach VDI 2078 beträgt der b-Wert 0,4. Geschlossen wird der Sonnenschutz in den Simulationsrechnungen, wenn die Einstrahlung über 150 W/m² Fensterfläche liegt.

Es wird eine gute Dichtheit der Gebäudehülle angesetzt. Als Luftwechsel durch Undichtigkeiten in der Gebäudehülle wird ein Wert von 0,1 h⁻¹ angenommen.

2.1.2 Bauteilaufbau

Die Innenwände werden als Leichtbau ausgeführt. Außenwand, Decke und Fußboden sind massive Bauteile aus Beton. Die Geschossdecke ist nicht abgehängt und der Fußboden nicht aufgeständert.

Der Wärmeschutz der Außenfassade entspricht etwa einem Niedrigenergiestandard.

Nachfolgend ist der schichtenweise Aufbau der verwendeten Bauteile mit den zugehörigen Stoffwerten dokumentiert.

Bauteilbezeichnung Außenwand					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	J/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Außenübergang					0,080
Außenputz	0,020	1400	1000	0,700	0,029
Wärmedämmung	0,180	15	920	0,040	4,500
Beton	0,150	2400	1200	2,100	0,071
Innenputz	0,015	1400	1000	0,700	0,021
Innenübergang					0,130
U-Wert	W/(m²K)				0,207

Bauteilbezeichnung Innenwand					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	J/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Innenübergang					0,130
Gipskarton	0,012	900	837	0,210	0,057
Wärmedämmung	0,060	120	800	0,040	1,500
Gipskarton	0,012	900	837	0,210	0,057
Innenübergang					0,130
U-Wert	W/(m²K)				0,534

Bauteilbezeichnung Geschoßdecke					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m ³	J/(kg K)	W/(mK)	m ² K/W
Innenübergang O -> U					0,170
Teppich	0,005	186	1360	0,060	0,083
Zementestrich	0,060	2000	1000	1,400	0,043
Min.-w.-Trittschalldämmung	0,040	120	800	0,040	1,000
Normalbeton	0,180	2400	920	2,100	0,086
Akustikputz	0,015	1400	1000	0,700	0,021
Innenübergang O -> U					0,170
U-Wert	W/(m²K)				0,636

Bauteilbezeichnung Fenster (30% Rahmenanteil)					
g-Wert	Verglasung				0,53
U-Wert	W/(m²K)	Fenster			1,22
Bauteilbezeichnung Verglasung (Zweischeiben Wärmeschutzvergl.; 4-15-4 mit Argonfüllung)					
g-Wert	Verglasung				0,53
U-Wert	W/(m²K)	Verglasung			1,10
Bauteilbezeichnung Fensterrahmen					
Materialbezeichnung	Dicke	Rohdichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Durchgangswiderstand
	m	kg/m³	J/(kg K)	W/(mK)	m²K/W
Außenübergang					0,080
Holz	0,060	600	2800	0,130	0,462
Innenübergang					0,130
U-Wert	W/(m²K)				1,49

Tabelle 2-1: Schichtenweise Definition der verwendeten Bauteile

2.1.3 Nutzung

Es werden die Standardnutzungsbedingungen entsprechend Modul 1.2 für ein Einzelbüro mit hohen internen Wärmequellen angesetzt. In den Simulationsrechnungen werden die in Abbildung 2-2 dargestellten Tagesprofile verwendet. Sie sind so erstellt, dass folgende Werte der Standardnutzung abgebildet werden:

- Spezifische Leistung Personen/Arbeitshilfen/Beleuchtung
- Wärmeenergie pro Tag
- Nutzungsprofil (qualitativ).

Auf die Berücksichtigung eines Jahresgleichzeitigkeitsfaktors wird bei den folgenden Berechnungen verzichtet.

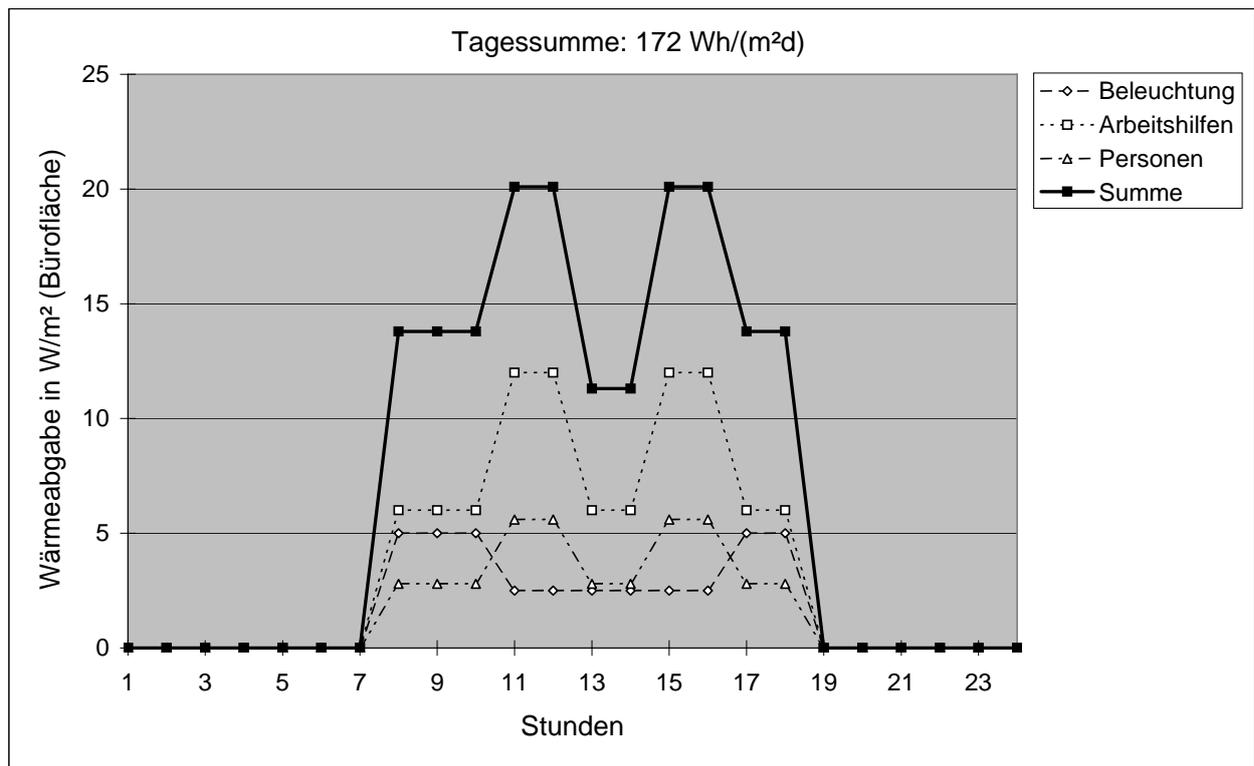


Abbildung 2-2: In den dynamischen Simulationsrechnungen berücksichtigtes Tagesprofil für die Nutzung „Einzelbüro / hoch“

2.1.4 Luftwechsel

Die Büros werden mit dem in DIN 1946 Teil 2 definierten Mindestaußenluftvolumenstrom versorgt. Bei der hier angenommenen Personenbelegungsdichte von 10 m² pro Person, sind der flächenspezifische und der personenspezifische Mindestaußenluftvolumenstrom identisch. Er beträgt 40 m³/h pro Person. Bezogen auf den untersuchten Büroraum (siehe Abbildung 2-1) entspricht diese einem Luftwechsel von 1,33 h⁻¹. Hierzu addiert sich ein Luftwechsel durch Undichtigkeiten von 0,1 h⁻¹, der konstant für 24 Stunden pro Tag angesetzt wird.

Der Außenluftvolumenstrom wird dem Raum mit Außenlufttemperatur zugeführt. Die entsprechenden Heiz- bzw. Kühllasten treten somit im Raum auf und werden bei der Berechnung mit berücksichtigt (siehe Abschnitt 1.1).

Liegt die Außenlufttemperatur unter der Raumlufttemperatur, kann mit dem Außenluftvolumenstrom ein Wärmestrom abgeführt werden, der dann nicht von der Kälteanlage bereitgestellt werden muss. Dieser Vorgang wird als freie Kühlung bezeichnet. Aus Komfortgründen kann die Zuluft dem Raum jedoch nur mit einer Untertemperatur von 8 Kelvin zugeführt werden. Bei konstantem Volumenstrom ist damit der über freie Kühlung abführbare Wärmestrom begrenzt. Dieser Effekt wird in den Berechnungen zunächst nicht berücksichtigt, sondern muss über die Betriebsführung im Einzelfall berücksichtigt werden.

Es wird angenommen, dass die Fenster geschlossen bleiben.

2.1.5 Klima

Für die Vergleichsrechnung werden die Wetterdaten aus Zürich verwendet. Dies ist erforderlich, da das Modul SIA 380/4 in dem jetzigen Entwicklungsstand keine deutschen Wetterdatensätze enthält.

2.1.6 Sonstiges

Die Innenwände zu Nebenräumen werden als adiabatisch angenommen, wobei die Speicherkapazität anteilig berücksichtigt wird. In den Simulationsrechnungen wird dies umgesetzt, indem auf beiden Seiten des adiabatischen Bauteils die gleiche Oberflächentemperatur angenommen wird.

In der dynamischen Simulation treten keine Sollwertabweichungen auf.

Außerhalb der Nutzungszeit wird eine Raumtemperaturabsenkung auf 15°C zugelassen.

2.2 Hinweise zur Modellbildung

Die Randbedingungen der Basisvariante können nicht in jedem Fall in den Kurzverfahren umgesetzt werden. Im Folgenden werden entsprechende Modifikationen oder besondere Annahmen dokumentiert, die in den weiteren Berechnungen verwendet werden.

2.2.1 Klimafläche

Als Sonnenschutz kann nur zwischen einer mittleren oder starken Abminderung gewählt werden. Keine dieser beiden Möglichkeiten bildet die Basisvariante exakt ab. Für die weiteren Berechnungen wird der Sonnenschutz „stark“ angesetzt, da dieser näher an der Basisvariante liegt als die Einstellung „mittel“.

	Basisvariante	Klimafläche „mittel“	Klimafläche „stark“
g-Wert: Verglasung + Sonnenschutz	0,21	0,37	0,11

2.2.2 VDI 2078

Das Kurzverfahren wird ausgehend von der Beschreibung in der VDI 2078 für die hier vorgenommenen Berechnungen an drei Punkten erweitert bzw. modifiziert:

- Außenluftwechsel über Lüftungsanlage berücksichtigt
- interne Wärmequellen
- Wetterdaten

Da bei dem hier berechneten Kältebedarf der Außenluftwechsel der Lüftungsanlage berücksichtigt wird (siehe Abschnitt 1.1), muss der Berechnungsansatz der VDI 2078 entsprechend modifiziert werden. Das Verfahren wird so erweitert, dass ein Luftwechsel innerhalb Nutzungszeit und ein Luftwechsel außerhalb der Nutzungszeit definiert und berücksichtigt werden kann. Der Lüftungswärmestrom (Gewinn oder Verlust) wird damit bei der stündlichen Wärmestrombilanz berücksichtigt. Eine Rückkopplung zwischen Luftwechsel und Speichermasse gibt es nicht, da der Einfluss der Speichermasse bei diesem Verfahren

lediglich über die Kühllastfaktoren in die Bilanz einfließt. Der Einfluss der Nachtlüftung kann damit nicht erfasst werden.

Als interne Wärmequellen wird nicht die Summe der Maximalwerte angesetzt, sondern die bei Berücksichtigung des Tageprofils zum Zeitpunkt des Maximums gleichzeitig wirksamen Leistungen (Personen und Arbeitshilfen 80 %, Beleuchtung 25 % des Maximalwertes).

Wetterdaten für Zürich sind in der VDI 2078 selbstverständlich nicht enthalten. Für die Berechnungen werden die erforderlichen Klimadaten aus dem Klimadatensatz Zürich abgeleitet, wobei die Situation an dem in den Simulationsrechnungen ermittelten kritischsten Tag berücksichtigt werden. Bei der Variation z.B. des Luftwechsels würde sich der Auslegungstag ändern. Dies wird in der Berechnung nicht berücksichtigt.

2.2.3 Kältetool der SIA 380/4

Der Abwärmestrom der Beleuchtung wird von dem Programm unterschiedlich berücksichtigt. Ist keine Beleuchtungssteuerung vorhanden, ist die Beleuchtung immer eingeschaltet. Beim Vorhandensein einer Beleuchtungssteuerung wird bis zu einer Raumtiefe von 6 Metern keine Beleuchtungsabwärme berücksichtigt. Ab 6 Metern wird angenommen, dass die Beleuchtung zu 100 % der Zeit eingeschaltet ist.

Beide Ansätze bilden den hier beschriebenen Fall nur ungenügend ab. Um die Situation der Basisvariante möglichst nah abzubilden, wird im Kältetool der Tagesmittelwert der Beleuchtungsleistung eingesetzt. Für die Basisvariante entspricht dieser

$$\text{Gl. 2-1} \quad \dot{q}_{B,m} = \frac{10 \frac{W}{m^2} \cdot 4 \frac{h}{d}}{11 \frac{h}{d}} = 3,6 \frac{W}{m^2}$$

mit

$\dot{q}_{B,m}$ über die Nutzungszeit gemittelte Leistung der Beleuchtung

Damit ist die dem Raum an einem Tag zugeführte Abwärme identisch mit den Angaben für die Basisvariante.

Bei der Berechnung der maximalen Kältelast wird im Kältetool nur ein natürlicher Luftwechsel durch Fugen von 0,2 W/m² angesetzt. Da in der vorliegenden Vergleichsrechnung der gesamte Außenluftwechsel im Raum wirksam wird, wird ein entsprechender Anteil bei der Kältelast ergänzt. Hierzu wird aus den Transmissionsverlusten (nur Fenster) und dem Fenster U-Wert die Temperaturdifferenz zum Zeitpunkt der maximalen ungedämpften Last für die Basisvariante berechnet. Unter Berücksichtigung des angenommenen Außenluftwechsels wird hieraus die zusätzliche Kältelast berechnet. Dieser Wert wird vereinfacht bei allen Berechnungen angesetzt, mit Ausnahme der Parametervariation des Luftwechsels.

2.2.4 Monatsbilanzverfahren / Elsberger

In [Elsberger 2001] werden Wochenende und Ferientage nicht berücksichtigt und damit an 365 Tagen des Jahres der Sollwert für die Kühlung gehalten. In den Simulationsrechnungen werden jedoch nur 250 Werktage pro Jahr angesetzt. Um dies zu berücksichtigen wird ein entsprechender Reduktionsfaktor bestimmt, analog zu dem Vorgehen beim SIA Kältetool:

$$\text{Gl. 2-2 } \zeta_d = \frac{\text{Werktage pro Jahr}}{365}$$

Dieser Reduktionsfaktor wird bei der Berechnung des Jahreskältebedarfs berücksichtigt, womit sich dieser abweichend zu Gl. 1-14 wie folgt berechnet:

$$\text{Gl. 2-3 } Q_{K,B} = \sum_i Q_{K,i} \zeta_d \cdot$$

In [Elsberger 2001] wird zur Berechnung des Jahreskältebedarfs eine mittlere Raumtemperatur von 22°C im Sommer angesetzt. Dabei muss beachtet werden, dass mit dem hier verwendeten Ausnutzungsgrad η (siehe Gl. 1-10) als nicht nutzbare Gewinne der Anteil an den gesamten Gewinnen beschrieben wird, der zu einem Anstieg der Raumtemperaturen von mehr als zwei Kelvin im Raum führt. Dies bedeutet, dass bei einer Raumtemperatur von 22°C über den Ausnutzungsfaktor die nicht nutzbaren Wärmegewinne quantifiziert werden, die Temperaturen über 24°C erzeugen.

In den Simulationsrechnungen wird jedoch ein Sollwert für die Kühlung von 26°C angesetzt. Um dies abzubilden müssten Ausnutzungsfaktoren verwendet werden, die für einen Anstieg der Raumtemperatur von vier Kelvin berechnet wurden. Da diese jedoch in den entsprechenden Regelwerken nicht vorliegen, wird in den hier durchgeführten Berechnungen abweichend zu [Elsberger 2001] die mittlere Raumtemperatur mit 24°C angesetzt. Hierdurch werden die nicht nutzbaren Gewinne jedoch etwas überschätzt, da die Ausnutzungsfaktoren implizieren, dass der Raum auf 24°C geheizt würde (d.h. die Raumtemperatur diesen Sollwert nicht unterschreitet). Der berechnete Jahreskältebedarf wird deswegen etwas zu hoch liegen.

2.3 Basisvariante

Für die in Abschnitt 2.1 definierten Randbedingungen wird mit den unterschiedlichen Verfahren der Jahreskältebedarf und die maximale Kältelast des Raumes berechnet. Das Ergebnis zeigen Abbildung 2-3 und Abbildung 2-4.

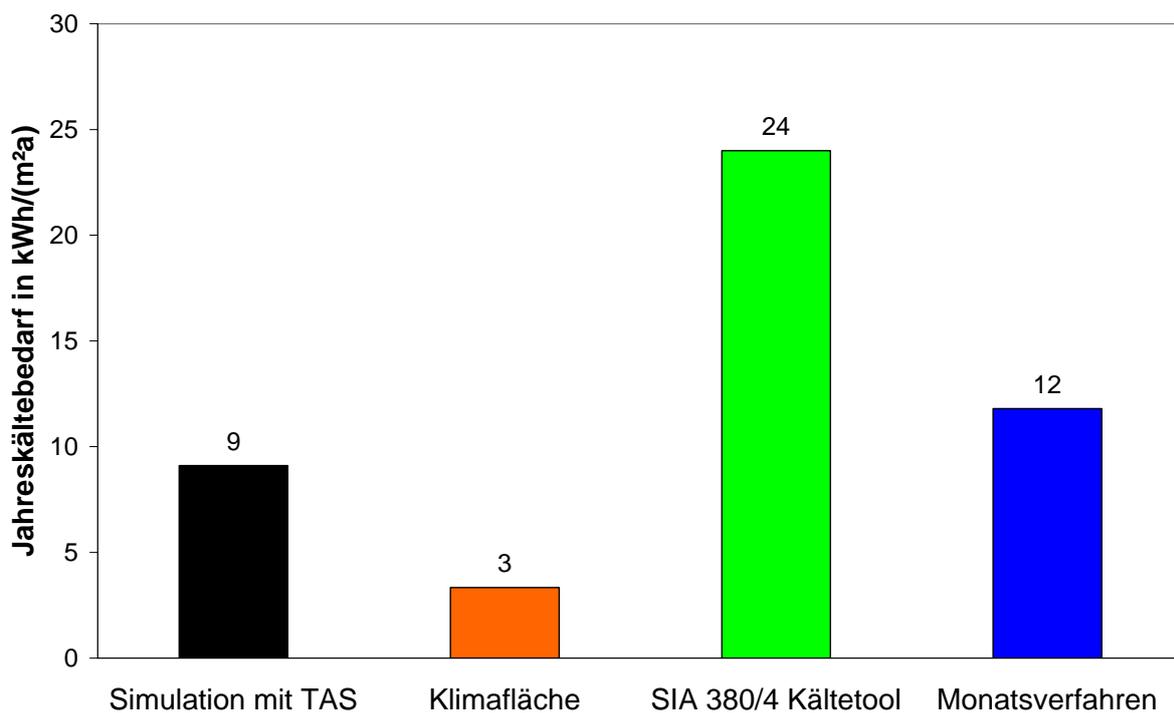


Abbildung 2-3 : Berechneter Jahreskältebedarf für die Basisvariante

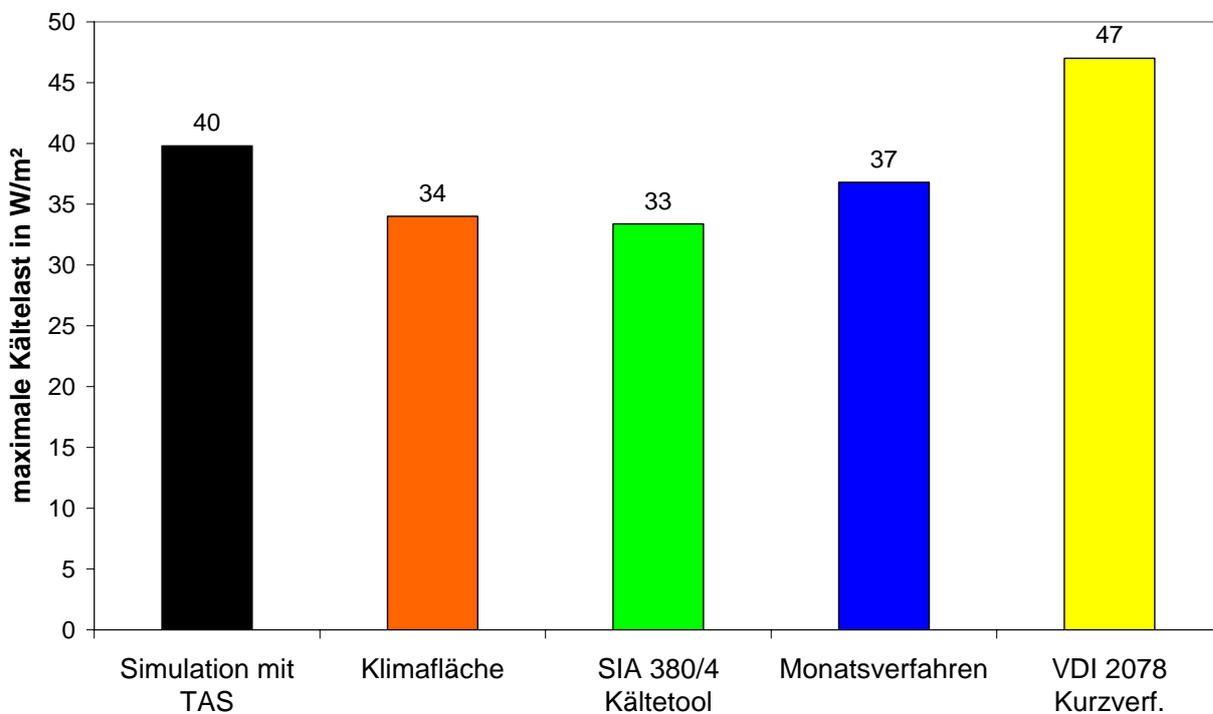


Abbildung 2-4: Berechnete maximale Kältelast für die Basisvariante

Über die dynamischen Simulationsrechnungen mit dem Programm TAS berechnet sich ein Jahreskältebedarf für den Beispielraum von 9 kWh/(m²a). Die maximale Kältelast beträgt 40 W/m². Diese Werte werden als Referenzwert für die weiteren Betrachtungen herangezogen.

Der über das Klimaflächenverfahren berechnete Wert des Jahreskältebedarfs liegt mit 3 kWh/(m²a) niedriger als in den Simulationsrechnungen. Der Grund liegt u. a. in dem besseren Sonnenschutz, der in der Berechnung berücksichtigt wird (siehe Abschnitt 2.2.1). Der bessere Sonnenschutz führt auch dazu, dass die maximale Kältelast geringer ist als in den Simulationsrechnungen.

Das Kältetool der SIA 380/4 berechnet mit 24 kWh/(m²a) einen deutlich höheren Wert für den Jahreskältebedarf. Auf der anderen Seite ist die maximale Kältelast mit 33 W/m² niedriger als in den Simulationsrechnungen ermittelt. Der Grund liegt vermutlich darin, dass in dem Kältetool eine spezielle Strategie für die Nachtkühlung angenommen wird. So läuft die Kälteanlage 24 Stunden durch. Der Sollwert wird in der Nacht von 26°C schrittweise auf 21,5°C reduziert. Damit werden die Speichermassen während der Nacht entladen und können während der Nutzungszeit eine größere Wärmemenge einspeichern. Durch diese Regelstrategie wird die maximale Kältelast reduziert, was sich auch in den Rechenergebnissen widerspiegelt. Eine nähere Analyse dieser Differenzen wird in Abschnitt 2.3.1 vorgenommen.

Mit dem Monatsbilanzverfahren berechnet sich ein Jahreskältebedarf von 12 kWh/(m²a). Dies Ergebnis stimmt gut mit den Simulationsrechnungen überein. Der etwas höhere Wert ist vermutlich auf die Tatsache zurückzuführen, dass die verwendeten Ausnutzungsgrade von einer Beheizung auf 24°C ausgehen (siehe Abschnitt 2.2.4). Die maximale Kältelast wird mit 37 W/m² ebenfalls befriedigend von dem Verfahren bestimmt.

Mit dem Kurzverfahren der VDI 2078 kann nur die maximale Kältelast berechnet werden. Diese liegt mit 47 kWh/(m²a) etwas über dem Wert der Simulationsrechnung. Dies ist zum Teil dadurch zu erklären, dass die VDI 2078 im Kurzverfahren von einem eingeschwungenen Zustand ausgeht. Über den Tag gesehen, wird dabei genauso viel Wärme in die Speichermassen ein- wie ausgespeichert. Der maximale Kältebedarf liegt im eingeschwungenen Zustand höher.

2.3.1 Vergleich SIA Kältetool mit TAS-Simulationen

Bei der Berechnung des Jahreskältebedarfs zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen dem SIA Kältetool und den Simulationsrechnungen. Um diese weiter zu analysieren, werden die Simulationsrechnungen so modifiziert, dass sie die Randbedingungen des Kältetools möglichst nah nachbilden. Das Ergebnis zeigt Abbildung 2-5.

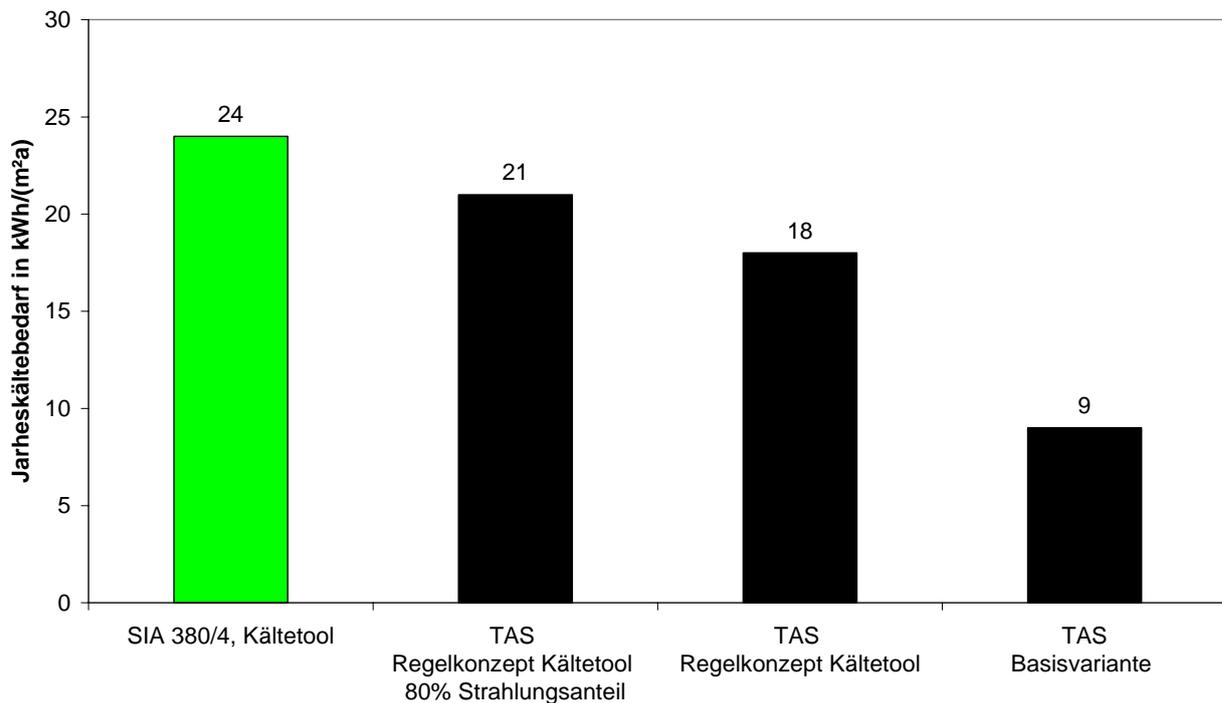


Abbildung 2-5: Nachvollziehen des Berechnungsergebnisses des SIA 380/4 Kältetool mit dynamischen Simulationsrechnungen mit TAS

Wird in den Simulationsrechnungen das spezielle Regelkonzept des SIA Kältetools (während der Nacht absenken der Traumtemperatur auf 21,5°C) realisiert, steigt der simulierte Jahreskältebedarf von 9 auf 18 kWh/(m²a) an. Es verbleibt aber immer noch eine deutliche Differenz, so dass allein durch das Regelkonzept die Differenzen nicht erklärt werden können.

In einem nächsten Schritt wird deswegen ein Strahlungsanteil von 80 % bei der Wärmeübertragung in den Raum angesetzt, was in etwa der Situation bei thermisch aktivierter Bauteilkühlung (Flächenkühlung) entspricht. Durch den hohen Strahlungsanteil bei der Wärmeeinbringung werden primär die Speichermassen gekühlt und die Lufttemperatur nur indirekt beeinflusst. Dadurch sinkt die mittlere Gebäudetemperatur in den Zeiten mit Kältebedarf. Zudem werden die an heißen Tagen auftretenden Kälteverluste durch Außenwände und Fenster durch die reduzierte Bauteiltemperatur erhöht. Beides spiegelt sich in dem erhöhten Wert für den Jahreskältebedarf wieder.

Beim Einsatz von thermisch aktivierten Bauteilsystemen wird der Jahreskältebedarf vom Kältetool recht gut vorausgesagt. Für den hier betrachteten Fall wird der Jahreskältebedarf jedoch deutlich überschätzt.

Als Ergänzung sei noch erwähnt, dass das Berechnungsverfahren des Kältetools für den Jahreskältebedarf (siehe Abschnitt 1.2.2) ein derartiges Regelkonzept nicht unterstellt, sondern auf einer Tagesbilanz der zu- und abgeführten Wärme beruht. Die Übereinstimmung mit trägen Flächenkühlsystemen ist somit nicht physikalisch begründet.

2.4 Parameterstudie

Die Basisvariante bildet nur einen Fall der möglichen Realisierungsvarianten ab. Um einen Eindruck von der Rechengenauigkeit der Verfahren unter anderen Randbedingungen zu bekommen, werden im Folgenden mehrere wichtige Gebäudeparameter variiert. Dies erlaubt die Einschätzung, ob die Kurzverfahren

- den Absolutwert von Jahreskältebedarf und maximaler Kältelast
- sowie die Veränderung der beiden Kennwerte

richtig beschreiben. Beide Aspekte werden bei der Diskussion jeweils beleuchtet, wobei der Schwerpunkt bei der Veränderung der beiden Kennwerte liegt. Die richtige Abbildung des Einflusses der unterschiedlichen Parameter ist wichtig, damit es bei einem Optimierungsprozess nicht zu Fehloptimierungen kommt. Die wesentlichen Aussagen zum Absolutwert sind bereits bei dem Vergleich der Basisvariante gemacht.

2.4.1 Fensterflächenanteil

Die Größe der Fensterfläche hat neben dem Erscheinungsbild Auswirkungen auf das energetische Verhalten eines Gebäudes. Nachfolgend wird untersucht, wie der Einfluss des Fensterflächenanteils auf den Jahreskältebedarf und die maximalen Kältelast von den unterschiedlichen Verfahren berechnet wird. Dazu wird die Fensterfläche des Beispielraumes zwischen 0 % auf 100 % variiert.

Die angenommenen Fenstergeometrien sowie die Variantenbezeichnungen sind in Tabelle 2-2 zusammengefasst. Die Fensterfläche (Verglasung inkl. 30 % Rahmenanteil) ist dabei auf die Innenfläche der Außenwand bezogen. Als zweite Zeile im Tabellenkopf ist der Anteil der Fensterfläche bezogen auf die Hauptnutzfläche angegeben, da dies ebenfalls eine häufig verwendete Größe ist.

Tabelle 2-2: Parameterausprägung und Variantenbezeichnung für die Variation der Fensterfläche

Fensterflächenanteil	% Außenwand	0%	10%	20%	30%	40%	50%
	m^2_{FE}/m^2_{HNF}	-	0.08	0.15	0.23	0.30	0.38
Glasfläche	m^2	0.0	1.6	3.2	4.7	6.3	7.9
Fensterfläche	m^2	0.0	2.3	4.5	6.8	9.0	11.3
Fläche opak	m^2	22.5	20.3	18.0	15.8	13.5	11.3

Fensterflächenanteil	% Außenwand	60%	70%	80%	90%	100%
	m^2_{FE}/m^2_{HNF}	0.45	0.53	0.60	0.68	0.75
Glasfläche	m^2	9.5	11.0	12.6	14.2	15.8
Fensterfläche	m^2	13.5	15.8	18.0	20.3	22.5
Fläche opak	m^2	9.0	6.8	4.5	2.3	0.0

Für die Berechnungen werden die in folgenden sonstigen Randbedingungen

Orientierung Fensterfläche	Süd	
g-Werte Fenster + Sonnenschutz	g = 0,21	außen liegende Markise
U-Wert Fenster	$U_{FE} = 1,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	Zweifachverglasung
U-Wert Außenwand	$U_{AW} = 0,21 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	18 cm Dämmung (WLG 040)

Nutzung	Einzelbüro / Hoch	siehe Abbildung 2-2 $\dot{Q}_{\text{int,max}} = 20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
Luftwechsel während Nutzungszeit	$n = 1,43 \text{ h}^{-1}$	Lüftungsanlage + Fugen
Bauschwere	118 kWh/(m ² K)	bei 60 % Fensterflächenanteil entspricht „mittel“ nach VDI 2078

Tabelle 2-3: Sonstige in der Simulation angenommenen Randbedingungen

Die maximale Kältelast sowie den Jahreskältebedarf, der sich unter diesen Randbedingungen mit den unterschiedlichen Verfahren für unterschiedliche Fensterflächenanteile berechnet, zeigen Abbildung 2-6 und Abbildung 2-7.

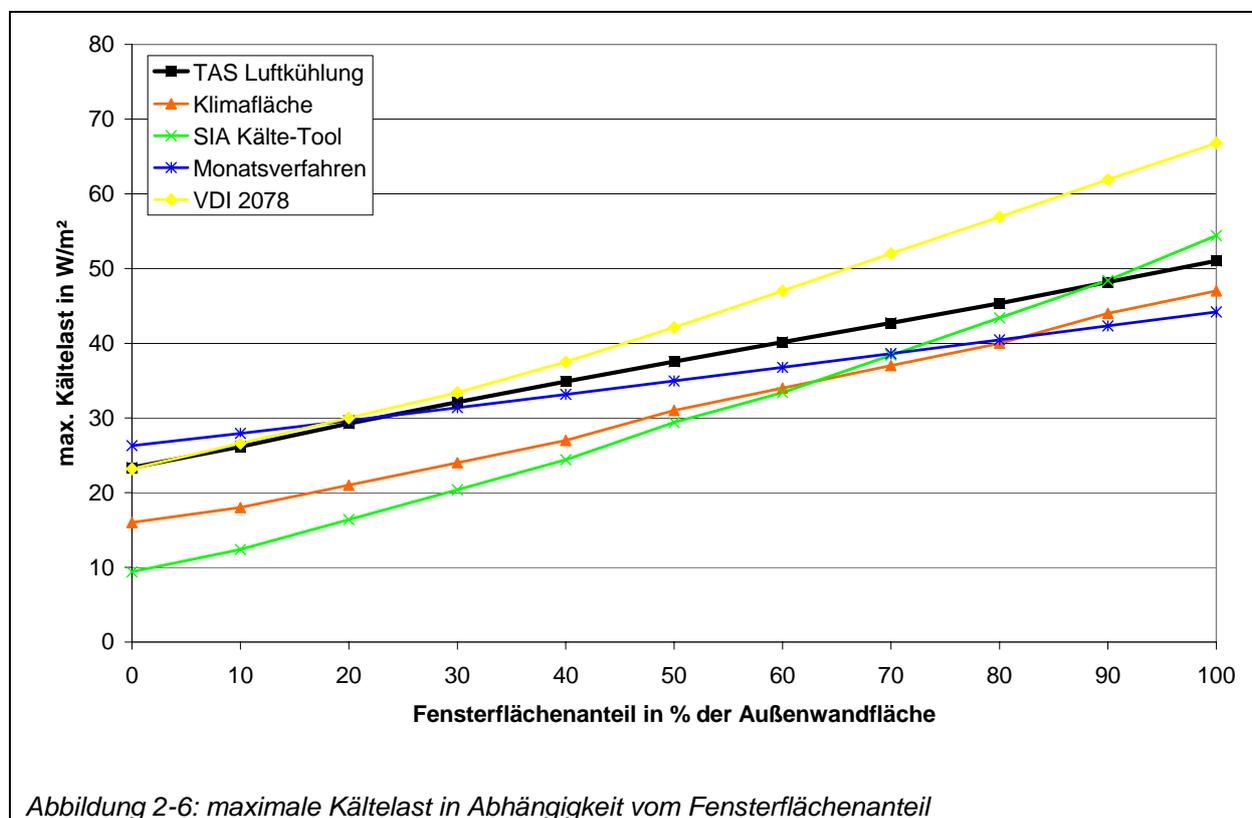


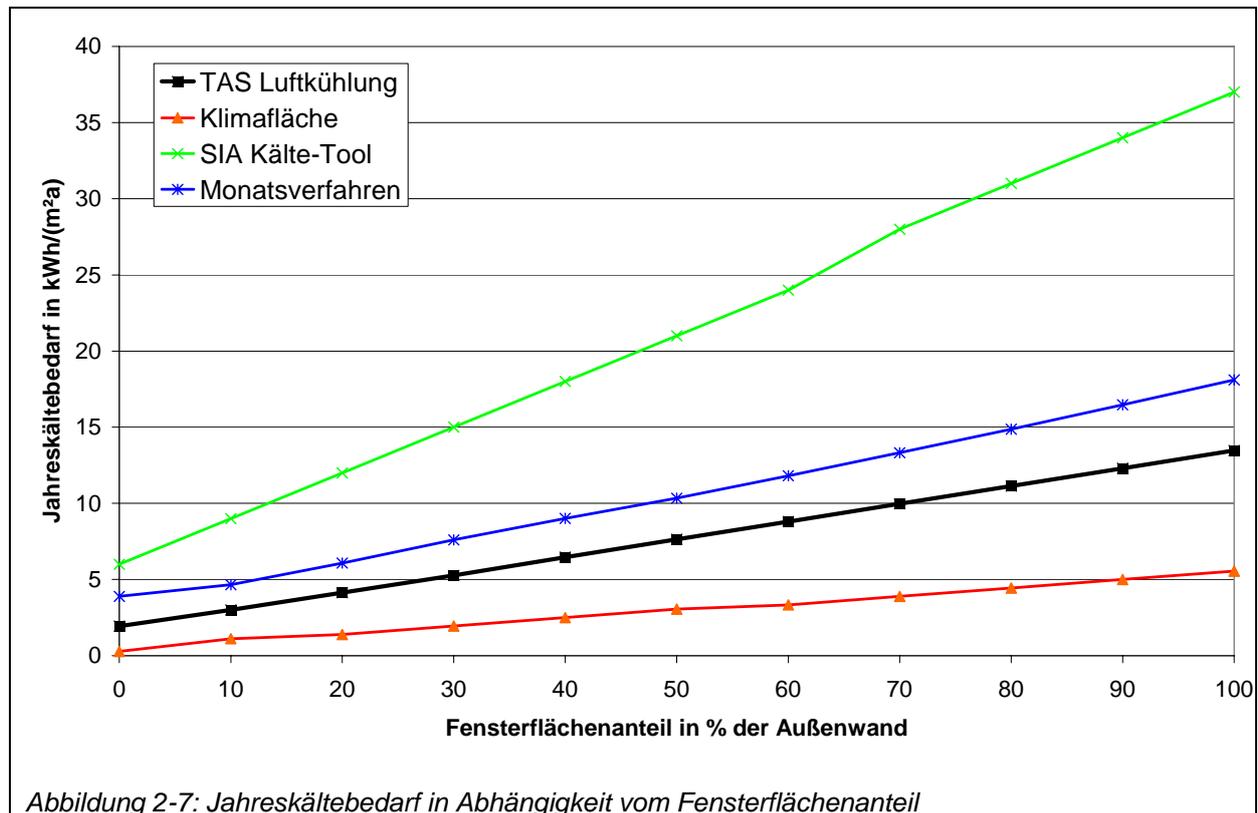
Abbildung 2-6: maximale Kältelast in Abhängigkeit vom Fensterflächenanteil

Die dynamischen Simulationsrechnungen zeigen einen linearen Anstieg der maximalen Kältelast. Dies wird von den Kurzverfahren weitgehend abgebildet.

Der Anstieg der Kurven ist bei dem Kurzverfahren der VDI 2078 und dem SIA Kältetool etwas steiler, was darauf hindeutet, dass bei diesen Verfahren die solaren Einträge einen größeren Einfluss haben. Dies kann zum einen in höheren solaren Einträgen in den Raum liegen. Zum anderen kann dies auf eine geringere wirksame Speichermasse hindeuten. In dem Fall wird ein geringerer Teil der solaren Einträge zwischengespeichert. Dadurch erhöht sich die konvektive Wärmelast.

Beim Monatsbilanzverfahren ist der Anstieg der Kurve flacher als in den Simulationen, was auf einen geringeren Einfluss der solaren Einträge hindeutet. Die oben genannte Begründung gilt in umgekehrter Weise.

Für die Klimafläche liegen die Absolutwerte unter den Simulationsrechnungen, was auf den besseren Sonnenschutz zurückzuführen ist.



Auch der Jahreskältebedarfs steigt bei zunehmendem Fensterflächenanteil linear an. Die Kurzverfahren bilden dies gut ab.

Das Klimaflächenverfahren liegt unter dem Niveau der Simulationsrechnung, wobei die Differenzen mit zunehmendem Fensterflächenanteil größer werden. Sowohl das geringere Niveau als auch die zunehmenden Differenzen sind auf den besseren Sonnenschutz zurückzuführen.

Das Kältetool der SIA 380/4 liegt hingegen deutlich über den Simulationsrechnungen und der Jahreskältebedarf steigt mit zunehmendem Fensterflächenanteil stärker an. Der stärkere Anstieg ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass bei der Berechnung des Jahreskältebedarfs hohe solare Einträge immer mit hohen Außentemperaturen korrelieren (siehe Abschnitt 1.2.2). Dadurch reduziert sich der Anteil der solaren Einträge, der über die Lüftung abgeführt werden kann, was den Kältebedarf erhöht.

Mit dem Monatsbilanzverfahren werden die Simulationsergebnisse gut wiedergegeben, wobei das Niveau etwas höher liegt.

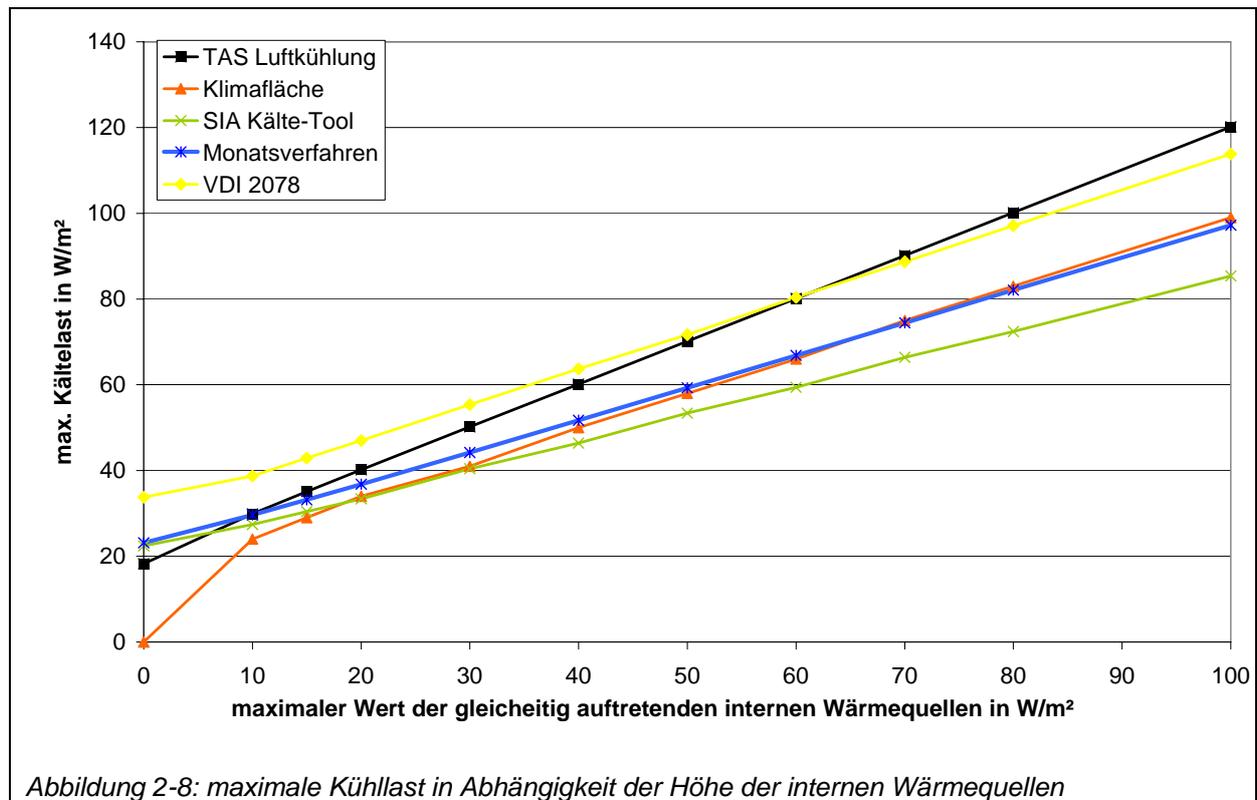
2.4.2 Höhe der Internen Wärmequellen

Die Energiebilanz wird durch die internen Wärmequellen, d. h. Abwärme von Personen, Beleuchtung und Arbeitshilfen, maßgeblich beeinflusst. Die internen Wärmequellen schwanken in der Praxis stark. Dies ist zum einen in den unterschiedlichen Nutzungsanforderungen, zum anderen in der unterschiedlichen Effizienz der eingesetzten Technik begründet.

In diesem Abschnitt wird untersucht, wie die maximale Kältelast und der Jahreskältebedarf des Beispielraumes durch die Höhe der internen Wärmequellen beeinflusst werden. In den Zeilen 2 bis 4 der Tabelle 2-4 sind die maximalen Leistungen und Volllastfaktoren für Beleuchtung, Personen und Arbeitshilfen dargestellt. Die in der 5. Zeile angegebene Summe der gleichzeitig auftretenden internen Wärmequellen ergibt sich als Produkt aus der maximalen installierten Leistung und den Volllastfaktoren. Dieser Wert berücksichtigt, dass zum Zeitpunkt der Maximums nicht die gesamte installierte Leistung wirksam ist (siehe Abbildung 2-2). Aufgetragen ist in Abbildung 2-8 und Abbildung 2-9 somit nicht die maximale installierte Leistung sondern die gleichzeitig auftretende Wärmelast d. h. die letzte Zeile von Tabelle 2-4.

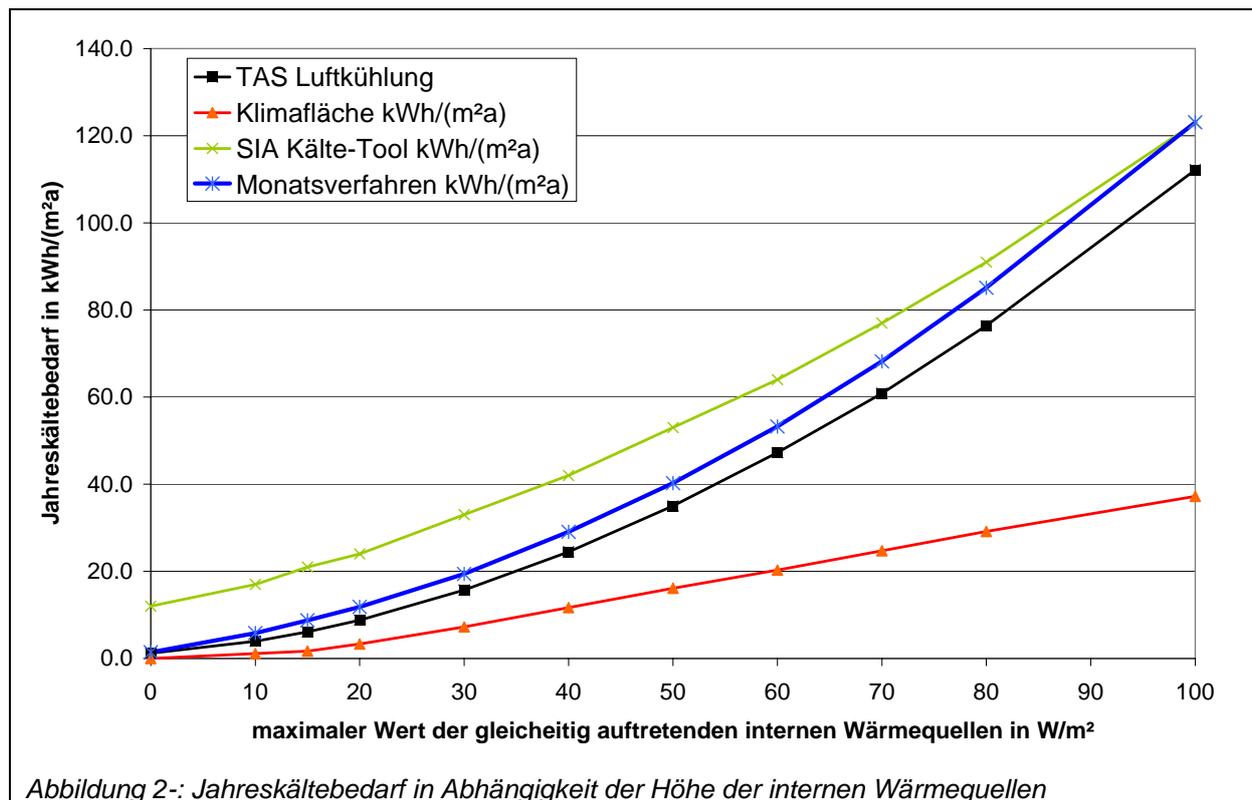
Varinatenummer			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Volllastfaktor
Beleuchtung	max.	W/m ²	0.0	5.0	7.5	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	49.9	0.25
Personen	max.	W/m ²	0.0	3.5	5.3	7.0	10.5	14.0	17.5	21.0	24.5	28.0	34.9	0.8
Geräte	max.	W/m ²	0.0	7.5	11.3	15.0	22.5	30.0	37.5	45.0	52.5	60.0	74.9	0.8
Summe	max. gleichzeitig	W/m²	0	10	15	20	30	40	50	60	70	80	100	

Tabelle 2-4: Höhe der internen Wärmequellen bei den unterschiedlichen Varianten



Im Bereich der maximalen Kältelast können alle Verfahren den linearen Anstieg abbilden. Lediglich das Klimaflächenverfahren weist bei einem Wert von 0 W/m² ein abweichendes Ergebnis auf.

Die Steigung der Kurven beschreibt die Dämpfung des zugeführten Wärmestroms durch die Speichermasse. Die Höhe der Dämpfung hängt ab von dem „Ladezustand“ der Speichermassen, der wirksamen Speicherkapazität und dem Strahlungsanteil der internen Wärmequellen. Bei den Simulationsrechnungen ist die Steigung am größten, was bedeutet, dass hier die geringste Dämpfung vorliegt. Das Kurzverfahren der VDI 2078 und das Klimaflächenverfahren weisen etwa die gleiche Steigung auf. Die dämpfende Wirkung der Speichermassen wird hier ähnlich quantifiziert, wobei sie etwas über den Werten der Simulation liegt. Am stärksten ist die dämpfende Wirkung der Speichermassen beim Kältetool der SIA 380/4 und dem Monatsverfahren. Dies ist vermutlich auf die in Abschnitt 2.3 erwähnte Regelstrategie der Kälteanlage zurückzuführen, bei der die Speichermassen in der Nacht stärker entladen werden.



Ein systematischer Unterschied tritt bei der Berechnung des Jahreskältebedarfs auf. Während in der Simulation aber auch in dem SIA-Kältetool und dem Monatsverfahren ein exponentieller Anstieg ausgewiesen wird, ergibt sich für das Klimaflächenverfahren ein weitgehend linearer Verlauf. Insbesondere bei hohen Werten der internen Wärmequellen wird dadurch ein deutlich geringerer Wert für den Jahreskältebedarf berechnet. Ein schlüssige Begründung für diese systematische Abweichung kann derzeit nicht gegeben werden. Es wird vermutet, dass dies mit der Annäherung des Tagesgangs der internen Wärmequellen über einen Sinusverlauf zusammenhängt.

2.4.3 U-Wert der Außenfassade

Über den U-Wert der Außenfassade wird die Höhe des Transmissionswärmestroms zwischen Raum und Umgebung beeinflusst. Wesentlich sind dabei die äußere und innere Oberflächentemperatur. Liegt die Oberflächentemperatur auf der Außenseite ($T_{o,A}$) unter der auf der Innenseite ($T_{o,I}$), wird ein Transmissionswärmestrom aus dem Raum an die Umgebung abgeführt. Dieser wird durch einen erhöhten Wärmeschutz reduziert. Dies kann zu einem Anstieg des Kältebedarfs führen. Liegt $T_{o,A}$ jedoch über $T_{o,I}$ - z.B. aufgrund einer höheren Außenlufttemperatur oder solarer Einstrahlung - verbessert ein hoher Wärmeschutz die sommerlichen Bedingungen. Diese Effekte werden zudem noch durch das dynamische Verhalten der Speichermasse der Außenwand überlagert.

Wie dieses Zusammenspiel in den Kurzverfahren wiedergegeben wird, soll in diesem Abschnitt untersucht werden. Der U-Wert der Außenfassade setzt sich dabei aus dem U-Wert der opaken Außenwand und dem U-Wert der Fenster zusammen. Während eine Änderung des U-Wertes der Außenwand über unterschiedliche Dämmstoffdicken erreicht wird, kann eine Änderung beim Fenster-U-Wert nur durch den Austausch des Fensters selbst realisiert werden. Mit dem U-Wert geht beim Fenster jedoch auch eine Änderung des g-Wertes einher. Der g-Wert beschreibt, welcher Anteil der auf das Fenster auftreffenden

Solarstrahlung in den Raum thermisch wirksam wird. Damit werden durch den Fensteraustausch nicht nur die Verluste, sondern auch die Gewinne des Raumes beeinflusst.

Die untersuchten Varianten sind so gewählt, dass ein möglichst großer Bereich für den U-Wert der Fassade abgedeckt wird. Dabei wird ein Fenster vorgegeben und die Dämmstoffdicken in sinnvollen Grenzen und Schrittweiten variiert. Die Ausprägung der einzelnen Varianten ist in Tabelle 2-5 dokumentiert.

Verglasung	-	3-fach WSV		2-fach WSV						1-fach		
U-Wert Fenster	W/(m²K)	0,8		1,24						4,45		
Dämmstoffdicke Außenwand (WLG 040)	cm	27	18	27	18	12	6	2	0	6	2	0
U-Wert Außenwand	W/(m²K)	0,14	0,21	0,14	0,21	0,30	0,56	1,26	3,40	0,56	1,26	3,40
U-Wert Fassade gesamt	W/(m²K)	0,54	0,56	0,80	0,98	1,01	1,12	1,40	2,25	2,89	3,17	4,03

Tabelle 2-5: Variantenausprägung bei der Veränderung des U-Wertes der Außenfassade

Abbildung 2-9 und Abbildung 2-10 zeigen die Ergebnisse des Vergleiches.

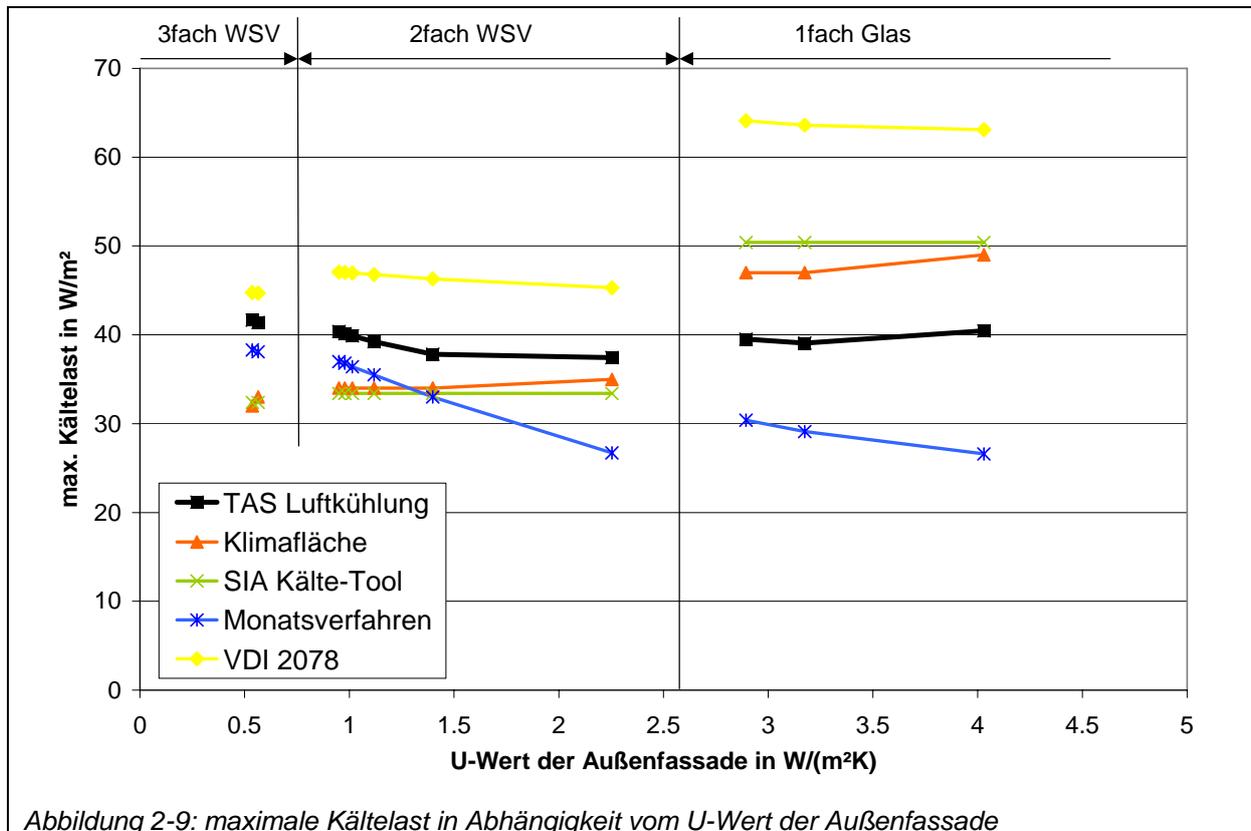


Abbildung 2-9: maximale Kältelast in Abhängigkeit vom U-Wert der Außenfassade

Die maximale Kältelast ist in den Simulationsrechnungen weitgehend unabhängig von der Dämmstoffdicke. Da es sich bei der maximalen Kältelast um ein Stundenmittelwert handelt, liegt zum Zeitpunkt des Auftretens des Maximums bei dem Wärmestrom in die Außenwand

ein instationärer Zustand vor. Der (stationäre) U-Wert ist nicht die richtige Größe, um den Wärmestrom richtig zu beschreiben. Dies und die geringen Temperaturdifferenzen zwischen Raum und Umgebung sind der Grund dafür, dass sich hier keine deutlichen Abhängigkeiten zeigen.

Dies bilden die Kurzverfahren weitgehend gut ab. Eine Ausnahme stellt das Monatsverfahren dar. Hier wird die maximale Kältelast aus dem Monatsmittelwert der Kältelast abgeleitet. Dieser wird für einen stationären Zustand und eine mittlere Außentemperatur ermittelt. Mit 18,5°C liegt die Monatsmitteltemperatur (im Monat des Maximums) im vorliegenden Fall (Wetterdaten Zürich) deutlich unter der Solltemperatur von 26°C. Wegen der größeren Temperaturdifferenz und dem stationären Berechnungsansatz bei der Ermittlung der Transmissionsverluste ergibt sich hier die stärkere Abhängigkeit. Der hier verwendete Berechnungsansatz wird zur Zeit weiterentwickelt, um diese Einflüsse besser berücksichtigen zu können.

Sprünge in den Kurven ergeben sich beim Wechsel der Verglasung. Diese sind auf die damit verbundenen Änderungen beim g-Wert (Gesamtenergiedurchlassgrad) zurückzuführen. Der g-Wert der 2fach und 3fach Wärmeschutzverglasung unterscheiden sich nur gering (Tabelle 2-6). Entsprechend sind die Änderungen hier weniger stark. Deutlicher sind die Unterschiede beim Wechsel von der 2fach zur 1fach Verglasung.

Am stärksten ist der Einfluss beim Kurzverfahren der VDI 2078. Dies bestätigt die bei der Variation der Fensterfläche gefundene Aussage, dass der Einfluss der solaren Einträge hier für den vorliegenden Fall überproportional berücksichtigt wird. Ebenfalls deutlich fällt der Einfluss beim Klimaflächenverfahren aus. Das Monatsverfahren liegt bei der Quantifizierung des Wechsels im g-Wert am nächsten bei den Simulationsrechnungen.

	g-Wert	
	Verglasung	Sonnenschutz + Verglasung
1fach Verglasung	0,84	0,34
2fach Wärmeschutzverglasung	0,53	0,21
3fach Wärmeschutzverglasung	0,5	0,2

Tabelle 2-6: In der Berechnung angenommene g-Werte für Verglasung und Sonnenschutz

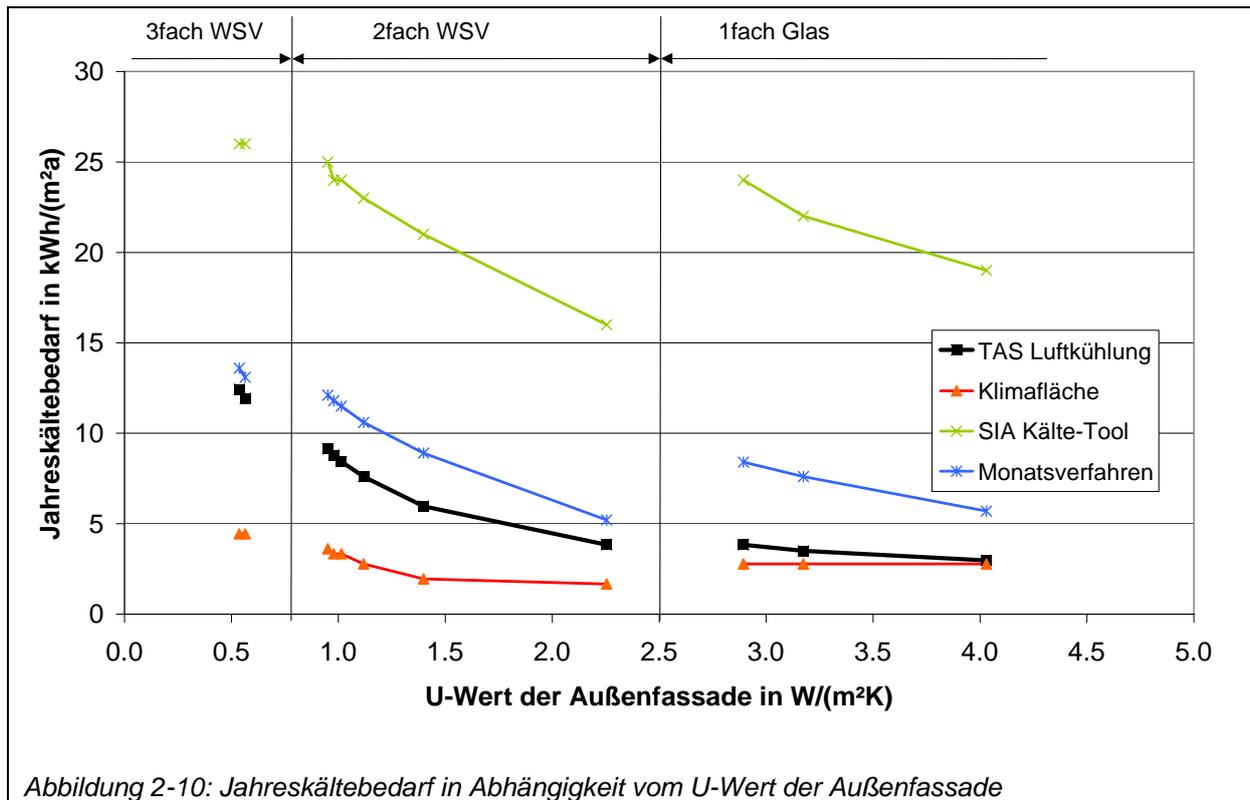


Abbildung 2-10: Jahreskältebedarf in Abhängigkeit vom U-Wert der Außenfassade

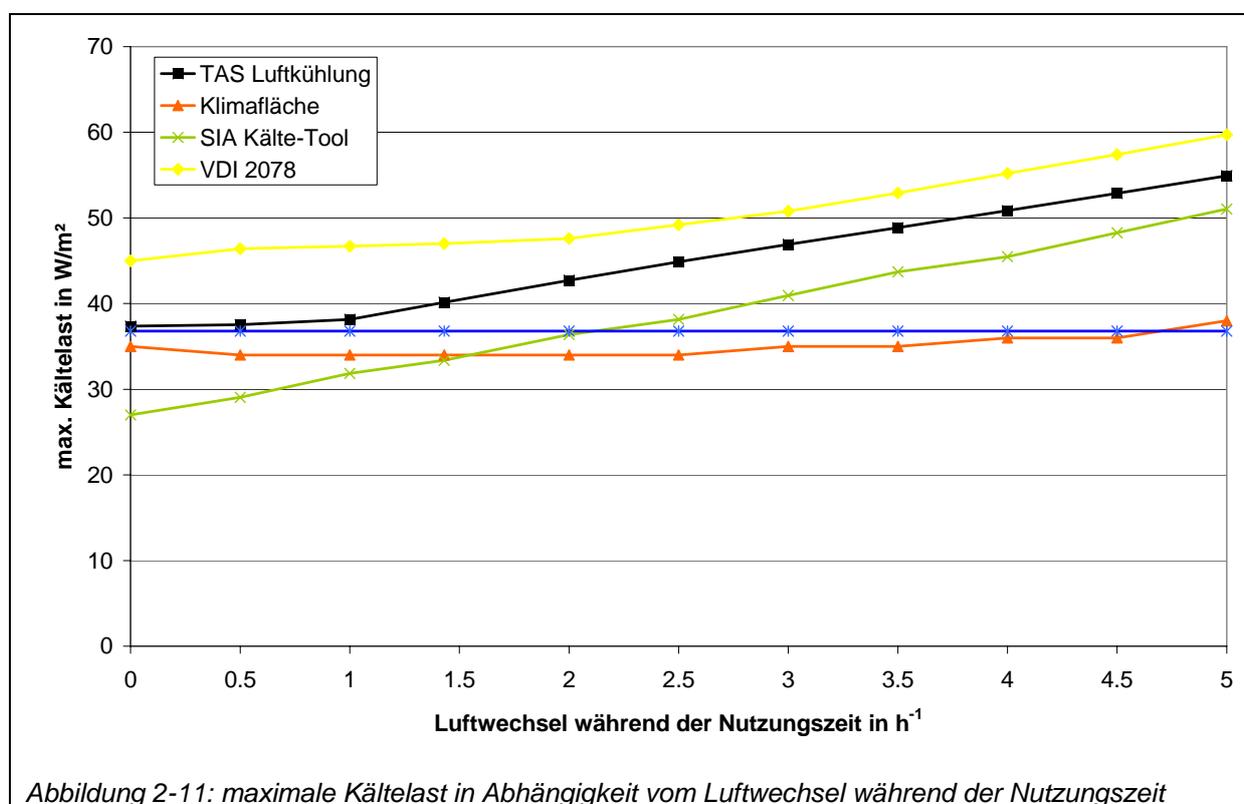
Mit abnehmendem U-Wert, d. h. zunehmendem Wärmeschutz, steigt der Jahreskältebedarf an. Dieser Anstieg wird überlagert von dem Einfluss der g-Werte der Verglasungen. Den Anstieg des Jahreskältebedarfs mit abnehmendem U-Wert bilden die Kurzverfahren ab, wobei die Klimafläche diesen etwas geringer beschreibt, das Kältetool etwas stärker. Das Monatsbilanzverfahren zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die Simulationsrechnungen. Bei dem Wechsel der Verglasung von 1fach zu 2fach bleibt der Wert für den Jahreskältebedarf in der Simulation konstant. Bei den Kurzverfahren werden unterschiedliche Auswirkungen berechnet. So hat der Wechsel von 1fach- zu 2fach-Verglasung bei der Klimafläche nur einen geringen Einfluss, was gut mit den Simulationsergebnissen übereinstimmt. Das Monatsverfahren berechnet einen etwas größeren Sprung. Beim Kältetool führt dieser Wechsel zu einer deutlichen Reduktion im Jahreskältebedarf. Hierfür ist vermutlich die Korrelation von hohen solaren Einträgen und hohen Außentemperaturen verantwortlich, die bei dem Verfahren „künstlich“ erzeugt wird. Die hohen solaren Einträge (hoher g-Wert der Einfachverglasung) fallen hierdurch mit hohen Außentemperaturen zusammen, bei denen die Temperaturdifferenz zwischen Raum und Umgebung gering oder sogar negativ sein kann. Die hohen solaren Gewinne fallen also mit geringen Transmissionsverlusten zusammen. Deswegen wirkt sich bei diesem Verfahren eine Änderung im g-Wert sehr deutlich aus.

2.4.4 Luftwechsel während der Nutzungszeit

Die DIN 1946 definiert einen personen- und einen flächenbezogenen Mindestaußenluftstrom für unterschiedliche Nutzungssituationen. Für die hier untersuchten Einzelbüros beträgt der Mindestaußenluftstrom $4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$. Bezogen auf eine lichte Raumhöhe von 3 Metern entspricht dies einem 1,3-fachen Luftwechsel in den Büros. Dieser Wert wurde in den bisherigen Berechnungen zugrunde gelegt, zuzüglich eines Luftwechsels über Undichtigkeiten von $n_F = 0,1 \text{ h}^{-1}$.

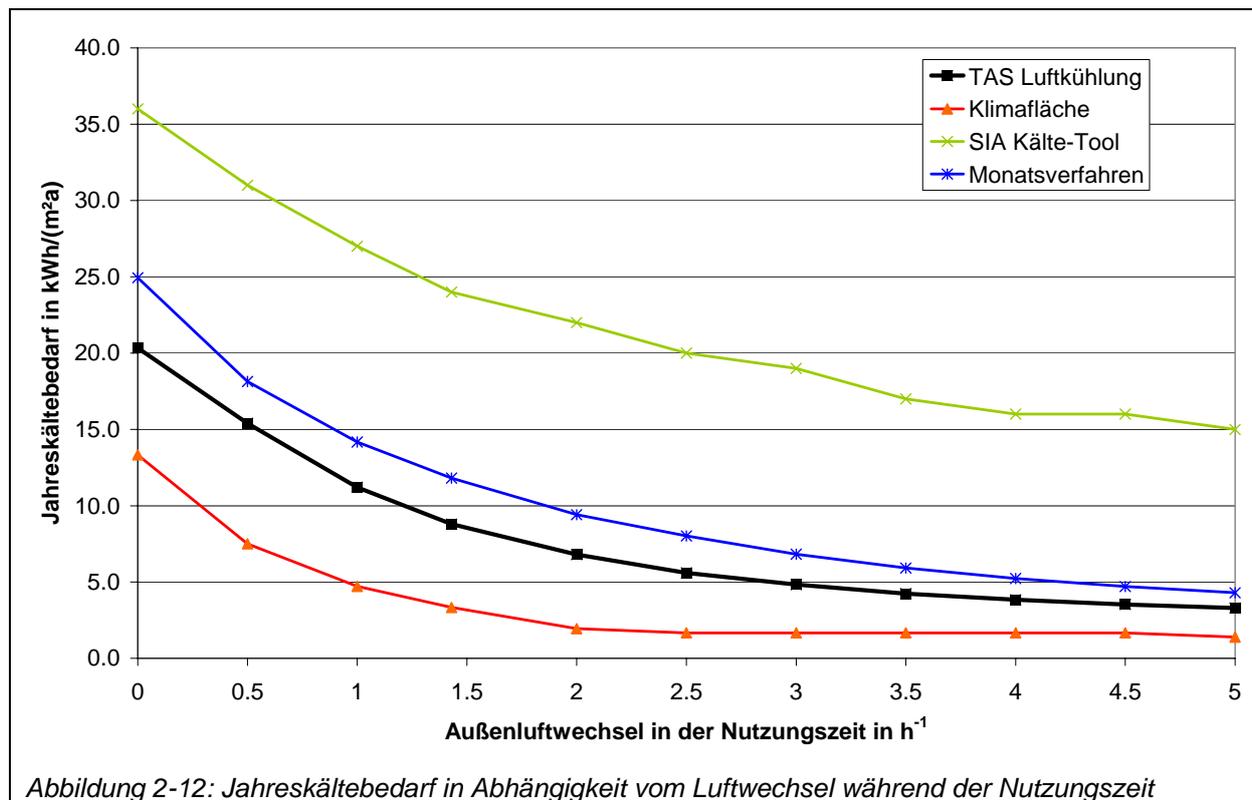
Welcher Luftwechsel in dem jeweiligen Einzelprojekt erforderlich ist, muss anhand der konkreten Randbedingungen entschieden werden. Dabei sollte der Beseitigung der Ursachen, d. h. Verringern der Verunreinigungslast, der Vorrang vor der Bekämpfung der Symptome - z. B. durch Erhöhen des Luftwechsels - gegeben werden. Konkret bedeutet dies, dass in der Planung Maßnahmen zur Vermeidung von Luftverunreinigungen möglichst weitgehend ausgeschöpft werden sollten. Hierzu zählen z. B. die Einrichtung von Raucherbereichen oder die Verwendung von Baustoffen und Einrichtungsgegenständen, die nur im geringen Maße Luftverunreinigungen abgeben.

Der Einfluss des Außenluftwechsels auf die maximale Kältelast und den Jahreskältebedarf wird im Folgenden dargestellt. Dabei wird der Luftwechsel schrittweise erhöht. Das Ergebnis der Berechnungen zeigen Abbildung 2-11 und Abbildung 2-12.



Bei der Abhängigkeit der maximalen Kältelast vom Außenluftwechsel lassen sich zwei unterschiedliche Bereiche identifizieren, die auch innerhalb einer Kurve auftreten: ein Bereich mit weitgehend konstanter Kältelast und ein Bereich mit linear ansteigender Kältelast. Die beiden Bereiche lassen sich den Zeitpunkten zuordnen, an denen die maximale Kältelast auftritt. In der Regel existiert bei der hier betrachteten Südausrichtung im Tagesverlauf eine Vormittags- und eine Nachmittagspitze. Die Vormittagsspitze entspricht dem weitgehend konstanten Bereich. Wegen der noch geringen Außentemperatur herrschen nur geringe Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen. Eine Erhöhung des Luftwechsels wirkt sich deswegen nur gering auf die maximale Kältelast aus. Mit zunehmendem Luftwechsel gewinnt aber die Nachmittagspitze an Bedeutung, da die Außentemperatur, und damit die Temperaturdifferenz innen-außen, am Nachmittag größer ist. Eine Zunahme des Luftwechsels wirkt sich deswegen stärker aus. Der Wechsel von einem weitgehend konstanten zu einem linearen Anstieg tritt auf, wenn das Tagesmaximum durch die Nachmittagspitze beschrieben wird.

Ein derartiger Wechsel im Kurvenverlauf ist bei den Simulationsergebnissen und dem Kurzverfahren der VDI 2078 festzustellen. Beim SIA-Kältetool wird vereinfachend eine konstante Temperaturdifferenz innen-außen (3,6 Kelvin) zum Zeitpunkt der maximalen Kältelast angesetzt (siehe Abschnitt 2.2.3). Entsprechend findet der Wechsel zwischen den Bereichen nicht statt und es ergibt sich der lineare Anstieg für alle Werte des Luftwechsels. Bei der Klimafläche, tritt ein Dominieren der Nachmittagsspitze nicht auf. Hier bleibt die Kurve für den gesamten Bereich des Luftwechsels konstant. Ebenfalls konstant ist der Einfluss des Luftwechsels beim Monatsbilanzverfahren. Der durch die Außenluft zugeführte Wärmestrom wird hier durch einen konstanten Zahlenwert (Grundlastanteil = 10 W/m²) in der Berechnung berücksichtigt.



Beim Jahreskältebedarf führt ein Anstieg des Luftwechsels zu einem exponentiellen Abfall der Werte. Dies ist auf den zunehmenden Einfluss der freien Kühlung zurückzuführen. Überhitzungen und damit der Einsatz der aktiven Kühlung können durch die vermehrte Zufuhr von kühler Außenluft reduziert werden.

Dies wird von den drei Kurzverfahren gut wiedergegeben. Unterschiede treten jedoch wie bisher im Niveau der Werte auf. Die Gründe wurden bereits bei der Diskussion der Ergebnisse für die Basisvariante aufgezeigt.

3 Bewertung der Kurzverfahren

Abschließend sollen die unterschiedlichen Kurzverfahren anhand der in Abschnitt 1 genannten Kriterien bewertet werden. Eine Zusammenfassung der Bewertungen ist in Tabelle 3-1 dargestellt. Die Benotung entspricht dabei folgender Abstufung. Die Benotungen sind nur relativ zu den anderen untersuchten Kurzverfahren zu sehen und sollten nicht als absolute Bewertung missverstanden werden.

++	+	0	-	--
sehr gut	gut	befriedigend	ausreichend	mangelhaft

Verfahren		Eingabe- aufwand	Genauig- keit	Flexibilität	Umsetz- barkeit in Excel	Integration Anlagen
Klimafläche	Energie	0	+	-	-	-
	Leistung		0			
SIA 380/4	Energie	+	-	+	++	+
	Leistung		0			
Monatsverfahren	Energie	0	++	+	+	++
	Leistung		+			
VDI 2078	Leistung	0	+	0	+	0

Tabelle 3-1: Gesamtbewertung der einzelnen Kurzverfahren

Eingabeaufwand

Die erforderlichen Eingabegrößen sind für alle Programme weitgehend gleich. Das Kältetool der SIA 380/4 bietet Standardvorgaben für die Speichermasse (leicht, mittel, schwer) und für die Höhe der internen Wärmequellen (niedrig, mittel, hoch), die den Eingabeaufwand reduzieren. Deswegen ist dieser Punkt mit „gut“ bewertet. Es muss jedoch eingeschränkt werden, dass es sich bei diesem Aspekt um eine Frage der Softwareumsetzung und nicht des Rechenverfahrens handelt. Standardvorgaben wären auch bei den anderen Verfahren prinzipiell möglich.

Rechengenauigkeit

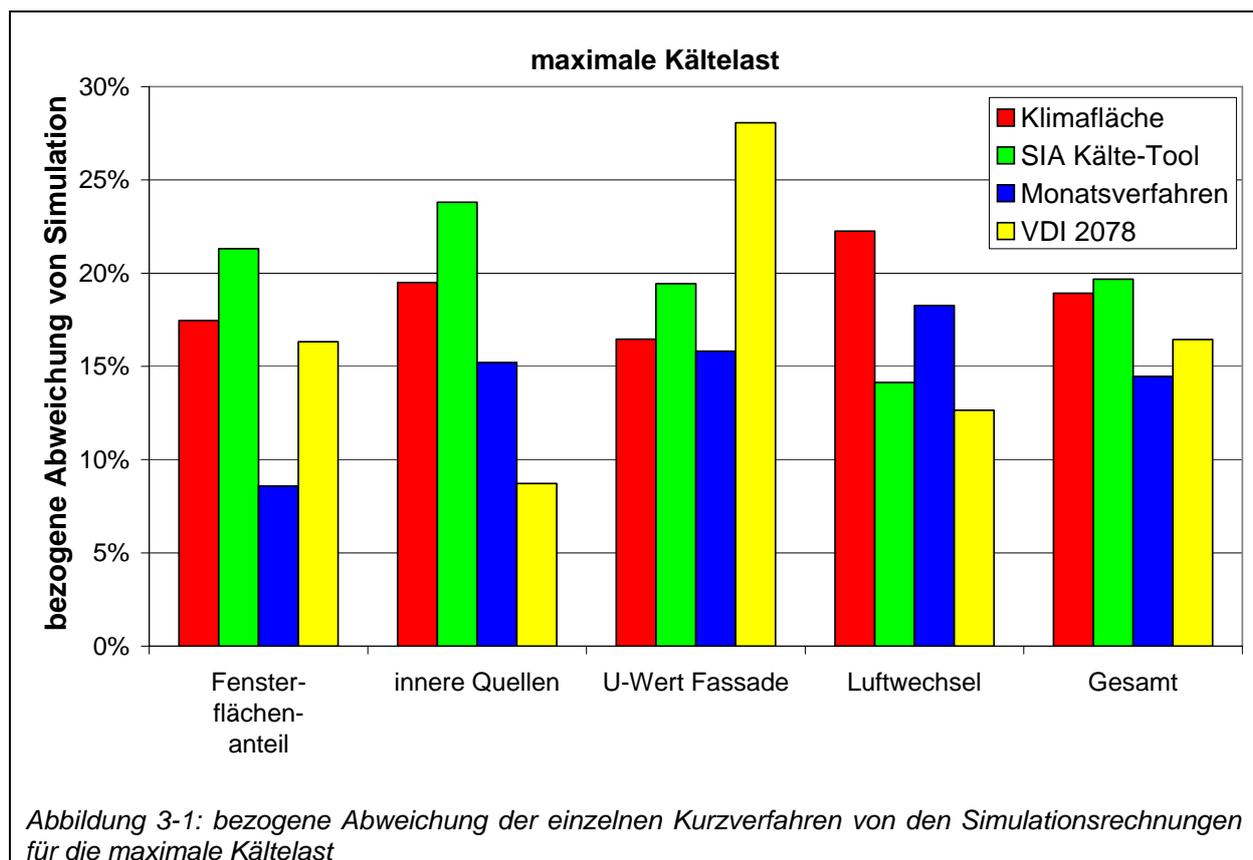
Die Rechengenauigkeit wurde in den vorherigen Abschnitten 2.3 und 2.4 ausführlich untersucht. Für eine zusammenfassende Bewertung der Abweichungen zu den Simulationsrechnungen wird für jede Parametervariation eine sogenannte „bezogene Abweichung“ ζ bestimmt.

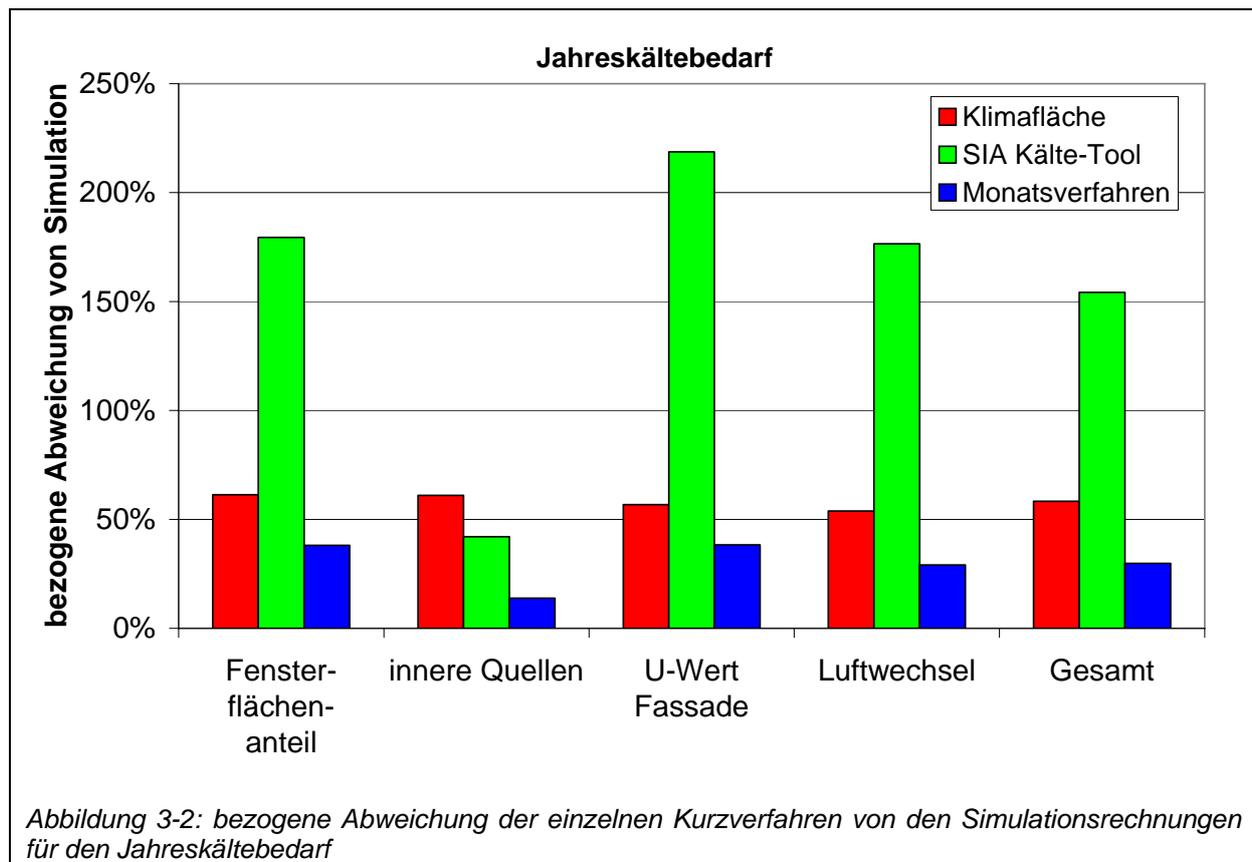
$$Gl. 3-1 \quad \zeta = \frac{\sum_{i=1}^{11} |W_{K,i} - W_{S,i}|}{\sum_{i=1}^{11} W_{S,i}}$$

mit

- ζ bezogene Abweichung von Simulationsrechnung
 i laufende Nummer der Parametervariationen (gerechnete Varianten)
 $W_{K,i}$ mit Kurzverfahren berechneter Zahlenwert für Parametervariation i
 $W_{S,i}$ mit Simulation berechneter Zahlenwert für Parametervariation i

In Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2 sind für die maximale Kältelast sowie den Jahreskältebedarf die bezogene Abweichung für alle vier Parametervariationen sowie ein Mittelwert (Gesamt) angegeben.





Mit dem Klimaflächenprogramm werden die Einflüsse der unterschiedlichen Gebäudeparameter in den meisten Fällen gut wiedergegeben. Eine Ausnahme bildet der Jahreskältebedarf bei Variation der internen Wärmegewinne. Hier wird ein zu geringer Anstieg des Jahreskältebedarfs berechnet. Die absoluten Werte für den Jahreskältebedarf und die maximale Kältelast liegen bei dem Klimaflächenprogramm unter den simulierten Werten. Dies ist auf den zu guten Sonnenschutz zurückzuführen, der in den Berechnungen angenommen werden musste. Insgesamt wird die Rechengenauigkeit im Bereich des Jahreskältebedarfs als (+) im Bereich der Kältelast mit (0) eingestuft.

Das Kältetool der SIA 380/4 bildet ebenfalls die Einflüsse der Gebäudeparameter in der Regel gut ab. Ausnahmen sind der deutliche Sprung im Jahreskältebedarf beim Wechsel von einer 1fach- zu einer 2fach-Verglasung (Abbildung 2-10) und der deutlich stärkere Anstieg des Jahreskältebedarfs bei zunehmender Fensterfläche (Abbildung 2-7). Beides ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass bei dem Berechnungsansatz die Korrelation zwischen solarer Einstrahlung und Außenlufttemperatur aufgehoben wird. Die hohen Werte der Einstrahlung werden dadurch in der Berechnung mit hohen Werten der Außenlufttemperatur gekoppelt.

Die absoluten Werte des Jahreskältebedarfs werden vom Kältetool nur ungenügend wiedergegeben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Entwicklung des Rechenverfahrens ein spezielles Regelverhalten der Kälteanlage unterstellt wurde, das insbesondere auf das System der thermisch aktivierten Bauteilkühlung abgestimmt ist. So läuft die Kälteanlage 24 Stunden. Der Sollwert wird in den Nachtstunden schrittweise von 26°C auf 21,5°C abgesenkt. Dies führt zu niedrigeren Werten für die maximale Kältelast aber zu höheren Werten für den Jahreskältebedarf. Dieser Effekt spiegelt sich auch in den Berechnungsergebnissen wider. Trotz dieser großen Abweichungen wird die

Rechengenauigkeit noch mit ausreichend (-) bewertet, da der Einfluss der unterschiedlichen Gebäudeparameter befriedigend wiedergegeben wird.

Das Monatsverfahren kann die simulierten Werte des Jahreskältebedarfs sowohl in Bezug auf die Absolutwerte wie auch auf die Veränderung bei der Variation wichtiger Gebäudeparameter mit guter Genauigkeit wiedergeben. Die Rechengenauigkeit wird im Bereich des Jahreskältebedarfs mit (++) im Bereich der maximalen Kältelast mit (+) bewertet.

Das Kurzverfahren der VDI 2078 erlaubt nur die Bestimmung der maximalen Kältelast. Hier werden die Einflüsse der unterschiedlichen Parameter gut wiedergegeben. In Bezug auf die Absolutwerte liegen die Ergebnisse etwas über den Simulationen. Aus diesem Grund wird die Rechengenauigkeit mit (+) bewertet.

Flexibilität

Im Prinzip konnten der als Basisvariante definierte Raum und die Parametervariationen in den Kurzverfahren abgebildet werden. Jedoch hat jedes Programm gewisse Einschränkungen.

Beim Klimaflächenverfahren kann im Bereich des Sonnenschutzes nur zwischen „mittel“ und „stark“ unterschieden werden. Dies ist eine wesentliche Einschränkung, da der Sonnenschutz das sommerliche Betriebsverhalten entscheidend beeinflusst. Auch kann bei der Definition der Nachtlüftung nur zwischen (aus, mittel, stark) unterschieden werden. Die Flexibilität wird deswegen nur mit ausreichend (-) bewertet.

Einschränkungen bei dem Kältetool der SIA 380/4 ergeben sich bei der Definition der Beleuchtung. Hier unterstellt das Programm für die Berechnung des Jahreskältebedarfs ein Betriebsverhalten, das nicht vom Nutzer beeinflusst werden kann (siehe Abschnitt 2.2.3). Insgesamt wird die Flexibilität mit (+) bewertet.

Beim Monatsbilanzverfahren können alle Einflussparameter abgebildet werden. Die Auswirkungen des Nachtluftwechsels werden jedoch nur durch einen sehr pauschalen Ansatz berücksichtigt. Die Flexibilität wird mit (+) bewertet.

Beim Kurzverfahren der VDI 2078 können alle Parameter wie gewünscht eingegeben werden, wobei die Auswirkungen der Nachtlüftung in der Berechnung nicht abbildbar ist. Zudem sind für die internen Lasten feste Tagesprofile mit vorgegebenen Werten für den Strahlungsanteil definiert. Die Flexibilität wird mit befriedigend (0) bewertet.

Umsetzbarkeit in Excel

Das Klimaflächenprogramm liegt als fertige Softwarelösung mit einer ansprechenden Oberfläche vor. Die Umsetzung in Excel ist im Prinzip möglich. Die Klimaflächen können als ASCII-Dateien exportiert werden und in Excel eingebunden werden. Allerdings handelt es sich um 168 unterschiedliche Klimaflächen. Die Umsetzung stellt einen größeren Aufwand dar. Die Umsetzbarkeit wird deswegen mit ausreichend bewertet.

Das Kältetool der SIA 380/4 liegt bereits als Excel-Makro vor. Dies könnte mit einigen Modifikationen übernommen werden. Zu klären ist hier die Frage, wie unterschiedliche Klimadaten in das Programm integriert werden können. Die Umsetzbarkeit in Excel wird deswegen mit sehr gut bewertet.

Das Monatsbilanzverfahren wurde für die Untersuchung in Excel umgesetzt. An keiner Stelle ergeben sich hierbei wesentliche Probleme. Die Umsetzbarkeit wird mit (+) bewertet.

Das Kurzverfahren der VDI 2078 ist problemlos in Excel abgebildet. Soll das Programm universell einsetzbar sein, müssen jedoch eine größere Anzahl von Zahlenwerten in

Tabellenform in Excel eingegeben werden. Wegen dieses Aufwandes wird die Umsetzbarkeit in Excel nur mit befriedigend bewertet.

Integration Anlagentechnik

Aus dem Jahrekältebedarf muss unter Berücksichtigung des Betriebsverhaltens der Kälteanlagen der Stromverbrauch berechnet werden. Die Integration unterschiedlicher Anlagenkonfigurationen ist somit von wichtiger Bedeutung.

Im Klimaflächenverfahren wird die weitere Anlagentechnik nicht betrachtet. Die Integration ist zwar prinzipiell möglich, jedoch aufwendig. Aus diesem Grund wird dieser Punkt mit (-) bewertet.

Im SIA Kältetool ist die Integration unterschiedlicher Anlagenkonfigurationen und die Kopplung mit der Lüftungsanlage bereits erfolgt. Diese Berechnung kann nach einer entsprechenden Überprüfung übernommen werden. Dieser Punkt wird mit (+) bewertet.

Im Monatsbilanzverfahren wird nicht nur der Jahreskältebedarf in den einzelnen Monaten berechnet, sondern es können durch Fallunterscheidungen die unterschiedlichen Luftbehandlungsfunktionen quantifiziert werden. Hiermit ist die Kopplung an unterschiedliche Anlagensysteme sehr gut möglich. Zudem wird ein Verfahren angegeben, wie statische Kühlsysteme mit in die Berechnung integriert werden können. Entsprechend wird dieser Punkt mit (++) bewertet.

Im Kurzverfahren der VDI 2078 werden zunächst konvektive Kühllasten berechnet. Die Integration unterschiedlicher Anlagensysteme ist damit prinzipiell möglich. Da keine entsprechende Umsetzung vorliegt, wird dieser Punkt nur mit (0) bewertet.

Fazit

Die Analyse zeigt Stärken und Schwächen der Kurzverfahren in den unterschiedlichen Bewertungsaspekten. Während die Umsetzung des Klimaflächenverfahrens in Excel aufwändig ist, ist die Rechengenauigkeit des Kältetools der SIA 380/4 nur mit „befriedigend“ bis „ausreichend“ bewertet. Das Kurzverfahren der VDI 2078 stellt sich insgesamt als „befriedigend“ dar, ist aber nur zur Ermittlung des maximalen Kältebedarfs geeignet.

Eine „sehr gute“ Bewertung bei der Rechengenauigkeit und der Integration der Anlagentechnik erreicht das Monatsbilanzverfahren. Da es auch in den übrigen Bereichen „gute“ Bewertungen aufweist, wird dieses Verfahren auf der Grundlage der durchgeführten Analysen zur weiteren Verwendung ausgewählt.

4 Zusammenfassung

Sofern eine Klimaanlage mit entsprechenden Luftbehandlungsfunktionen vorhanden ist, muss bei der Beurteilung des Stromverbrauchs von Gebäuden auch der Jahreskältebedarf berücksichtigt werden. Ziel dieses Moduls ist es, ein Berechnungsverfahren zu ermitteln, über das der Jahreskältebedarf und die maximale Kältelast mit begrenztem Zeitaufwand abgeschätzt werden kann. Untersucht wird die Eignung folgender Kurzverfahren:

1. Klimaflächenverfahren	2. Kältetool der SIA 380/4
3. Monatsverfahren	4. Kurzverfahren der VDI 2078

Bewertet werden dabei neben der Rechengenauigkeit der Eingabeaufwand, die Flexibilität bei der Definition unterschiedlicher Nutzungssituationen, die Umsetzbarkeit in der Excel-Arbeitshilfe und die Integration unterschiedlicher Anlagenkonfigurationen.

Um die Rechengenauigkeit der Kurzverfahren einschätzen zu können, wird die maximale Kältelast und der Jahreskältebedarf für einen Beispielraum über dynamische Simulationsrechnungen und mit den unterschiedlichen Kurzverfahren berechnet. Aus dem Vergleich mit den simulierten Werten wird die Rechengenauigkeit der Kurzverfahren bewertet. Untersucht wird zum einen, wie gut die Kurzverfahren die Absolutwerte der maximalen Kältelast und des Jahreskältebedarfs nachbilden. Zum anderen wird im Rahmen einer Parametervariation analysiert, ob die Kurzverfahren die Veränderungen der beiden Werte bei der Variation wichtiger Gebäudeparameter richtig beschreiben. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse zeigt Tabelle 4-1. Die Benotung entspricht dabei folgender Abstufung. Die Benotungen sind nur relativ zu den anderen untersuchten Kurzverfahren zu sehen und sollten nicht als absolute Bewertung missverstanden werden.

++	+	0	-	--
sehr gut	gut	befriedigend	ausreichend	mangelhaft

Verfahren		Eingabeaufwand	Genauigkeit	Flexibilität	Umsetzbarkeit in Excel	Integration Anlagen
Klimafläche	Energie	0	+	-	-	-
	Leistung		0			
SIA 380/4	Energie	+	-	+	++	+
	Leistung		0			
Monatsverfahren	Energie	0	++	+	+	++
	Leistung		+			
VDI 2078	Leistung	0	+	0	+	0

Tabelle 4-1: Gesamtbewertung der einzelnen Kurzverfahren

Auf der Grundlage dieser Bewertung wird das Monatsbilanzverfahren für die weitere Verwendung in dem MEG-Verfahren ausgewählt. Es weist eine sehr gute Bewertung bei der Rechengenauigkeit und der Integration der Anlagentechnik auf. Auch in den übrigen Bereichen werden gute Bewertungen erreicht.

5 Literaturverzeichnis

- [Burmeister 1995] Burmeister, H.; B. Keller: Die gebäuderelevante, quantitative Darstellung von Klimata; Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 21 (Teil I) und 23 (Teil II); 1995
- [Elsberger 2001] Elsberger, M.: Nutzenergiebedarf klimatisierter Gebäude mittels Monatsbilanzierung; IfE Schriftenreihe – Heft 43; Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München; München 2001
- [Kamps 1996] Kamps, O.: Beschreibung und Bewertung der im integrierten Simulationsprogramm TAS verwendeten mathematischen und physikalischen Berechnungsmodelle; Diplomarbeit am Institut für Energietechnik, TU Berlin, 1996
- [Keller 1998] Keller, B.; E. Magyari: Eine allgemeingültige Strategie für die gleichzeitige Minimierung des Energie- und Leistungsbedarfs für Heizen und Kühlen; Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Professur für Bauphysik, Forschungsbericht 5/1998; Zürich, 1998
- [Knissel 1998] Knissel, J.: Validierung des Simulationsprogramms TAS - Vergleich mit Messergebnissen aus dem Passivhaus Darmstadt-Kranichstein; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt, 1998
- [Rouvel 2003] Rouvel, L.; P. Deutscher; M. Elsberger: Vereinfachtes Berechnungsverfahren für den sommerlichen Wärmeschutz sowie Einsatzbedingungen von RLT-Anlagen; Band 2 des Forschungsvorhabens „Energieeinsparverordnung; Untersuchung differenzierter Ansätze zur energetischen Bewertung von Gebäuden mit Anlagen zur Raumkonditionierung“ im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Wohnungswesen; Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München; München 2003
- [Seidinger 2002-1] Seidinger, W.; M. Achermann: Entwicklung eines Kälte-Tools zur Methodik SIA 380/4 „Elektrische Energie im Hochbau“; Bundesamt für Energie; Bern, 2002
- [Seidinger 2002-2] Seidinger, W.; S. Gasser; T. Arpagaus: Anwendungsinstrument zu SIA 380/4, Elektrische Energie für Lüftung und Kälte, Eine Anleitung für Fachplaner und Behörden; Konferenz der Kantonalen Energiedirektoren; Vertrieb: <http://www.380-4.ch>; Schweiz, 2002