Erläuterungen zur App EG6Z

Mit Hilfe der App EG6Z lässt sich untersuchen, wie ein Gebäude optimal gebaut und betrieben werden kann.
Alleiniger Energieträger zur Versorgung des Gebäudes sei elektrischer Strom. Im Winter wird das Gebäude mittels Warmwasser von (reversiblen) Luft-Wasser-Wärmepumpen (über Gebläsekonvektoren) beheizt. Im Sommer wird das Gebäude mittels Kaltwasser von den Wärmepumpen (über Gebläsekonvektoren) gekühlt. Das Gebäude wird kontrolliert dezentral belüftet. Das Trink-Warmwasser kommt aus Elektro-Durchlauferhitzern.
Für einen vorzugebenden Zeitraum (1 Tag bis 4 Jahre) simuliert die App das Verhalten des Gebäudes bezüglich Temperatur und Feuchte mit bis zu 6 Zonen. Dazu werden Wetterdaten für Leinefelde genutzt [2].

1. Start

Die Web-App EG6Z wird in einem beliebigen Browser mit dem Laden von

gebsi-4b82f.web.app

aufgerufen. Das Display sollte mindestens 800 Pixel breit sein. Javascript muss aktiviert sein. Die App nutzt Dienste von Firebase [1].

2. Eingeben

Nach dem Laden wird aus dem lokalen Speicher des genutzten Browsers das Objekt „EG6Z_Eingaben“ in den Sitzungsspeicher als Objekt „g6_eingaben“ übertragen. Sollte das Objekt nicht im lokalen Speicher vorhanden sein, wird ein Default verwendet.
Nach dem Laden erscheinen *die* Werte in den Textfeldern, die in dem Objekt „g6_eingaben“ gespeichert sind.
In die Textfelder können mittels Tastatur neue Werte eingetippt werden. Durch Betätigung des Buttons "Eingaben übernehmen" wird der Sitzungsspeicher aktualisiert.
Nach Betätigen des Buttons „Eingaben in lokalen Speicher schreiben“ werden alle im Sitzungsspeicher gespeicherten Werte dauerhaft lokal gespeichert.
Durch Betätigen des Buttons „Daten im lokalen Speicher löschen“ können alle lokal gespeicherten Eingabewerte gelöscht werden.
Für die Eingaben in Textfelder gelten die allgemeinen Regeln üblicher Textbearbeitungs- und Tabellenkalkulationsprogramme. Dezimalzahlen müssen in angloamerikanischer Manier mit Dezimalpunkt geschrieben werden. (*In diesen Erläuterungen wird die gleiche Schreibweise verwendet.*)

2.1 Allgemeine Angaben zum Gebäude

Die Bezeichnung des Gebäudes wird eingegeben.
Für die Berechnung des aktuellen Strompreises werden Angaben in den Textfeldern zum Stromtarif erwartet.
Für Heizung bzw. Kühlung des Gebäudes sind Luft-Wasser-Wärmepumpen vom Typ Wolf CHA-16/20-400V-M2 CS-e9-C2 vorgesehen [3], ihre Anzahl ist zu wählen.
Weiter ist das Volumen des zugehörigen Wasserspeichers vorzugeben. Ferner wird festgelegt in welchem Zeitraum die Wärmepumpen im Sommerbetrieb laufen sollen. Die Solltemperatur für den Wasserspeicher kann ausgewählt werden.

2.2 Angaben zum Baukörper

Es werden Daten zu Außen- und Innenwänden benötigt: anliegende Zonen, Fläche, U-Wert und Dicke. Die Fläche dieser Körperteile soll aus Außenmaßen berechnet werden. Für die Innenwände kann vereinfachend statt einer Zahl für den U-Wert ein Wort (beispielsweise „innen“) eingetragen werden.
Fenster werden entsprechend ihrer Zone und ihrer Ausrichtung zu Gruppen zusammengefasst. Die Fläche der Fenster ist deren Bruttofläche (d.h. einschließlich Rahmen). Azimut und Zenitwinkel sind als Koordinaten der Normale auf der äußeren Oberfläche des Fensters anzugeben. Der U-Wert ist auf die Bruttofläche bezogen. Der g-Wert (zwischen 0 und 1) ist der Gesamtenergiedurchlassgrad bei senkrechter Sonneneinstrahlung auf das Fenster bezogen auf die Bruttofläche des Fensters. Sollten Fenster mit dimmbarem Sonnenschutzglas (SageGlass Climatop Classic 42.1EC-12-4-12-4 [4]) ausgerüstet sein, ist für deren U- und g-Werte das Kürzel EC einzuschreiben.

2.3 Angaben zu Zonen und deren Gebäudetechnik

Die Zone wird mittels Button gewählt. Die Größe des umbauten Raumes der Zone muss eingetragen sein. Ist keine Zahl eingetragen, sondern z.B. „ - “, gilt diese Zone als nicht definiert.
Die Zahl der in der Zone installierten Gebläsekonvektoren Swegon AirBlue GK-VB 043 mit Elektroheizregister [7] ist anzugeben (auch die Zahl 0 wird akzeptiert).
Zur Trinkwarmwasserbereitung werden Durchlauferhitzer CLAGE DCX 13 Next [5] an jeder Zapfstelle für Warmwasser installiert.
Die Zonen werden über Abluftsysteme belüftet: Raumluft wird mit einem Ventilator aus der Zone gefördert; Außenluft strömt durch den erzeugten Unterdruck (über Außenbauteil-Luftdurchlässe) in die Zone nach. Zonen dürfen bezüglich des Luftstroms in Reihe geschaltet werden. Jeder Abluftventilator soll einen Durchsatz von 0.2 m³/h (stufenlos) bis 4.0 m³/h je m³ umbauten Raumes der zugehörigen Zone(n) ermöglichen.

2.4 Angaben zur Nutzung der Zonen

Die Zone wird dazu mittels Button gewählt. Verschiedene Arten der Nutzung werden durch (bis zu 6) Nutzungsprofile definiert:

- Kennung des Profils (A … F)
- Zahl der Erwachsenen, die sich in der Zone durchschnittlich aufhalten
- durchschnittliche Betätigung dieser Erwachsenen (in met)
- Sollwerte für die Lufttemperatur (°C)
- durchschnittlicher Warmwasserverbrauch (in l/min)
- Wärmeabgabe (in kW) von Geräten
- (nächtliche) Beleuchtung (in kW) .

Mit dem metabolischen Äquivalent (met) wird der Energieverbrauch verschiedener Aktivitäten verglichen [8,9]. Er wäre beispielsweise bei ruhigem Liegen 1.0, bei leichter Arbeit in Büro bzw. Schule 2.0, bei leichter körperlicher Arbeit (hauswirtschaftliche Tätigkeiten, Gymnastik) 3.4 und bei schwerer körperlicher Arbeit (handwerkliche Tätigkeiten, Ballspielen) 5.7 met.
Als nächtliche Beleuchtung gilt die, die fehlendes Tageslicht ersetzt. Müssen bestimmte Beleuchtungskörper auch bei Tageslicht eingeschaltet sein, ist die von ihnen verbrauchte Energiemenge der Wärme von Geräten zuzuschlagen.
In den Plan der Nutzung ist das zutreffende Profil einzutragen.

2.5 Wetterdaten

Die App EG6Z nutzt Wetterdaten der Station 02925 des Deutschen Wetterdienstes [2] in Leinefelde. Leinefelde (Breite 51.4° N, Länge 10.4° O) liegt in der Mitte Deutschlands und wird deshalb als repräsentativ behandelt.
Folgende Dateien des DWD lieferten Daten

- stundenwerte_TU_02925_akt.zip
- stundenwerte_TU_02925_19560101_20231231_hist.zip

- stundenwerte_ST_02925_row.zip .

Diese Dateien wurden mit Hilfe des eigens hierzu geschriebenen Java-Programms GBSMWD für den Zeitraum 2021-01-01 bis 2024-12-31 ausgewertet. Dieses Programm hat die Werte für

- Lufttemperatur in 2m Höhe
- relative Luftfeuchte in 2m Höhe
- Stundensumme der diffusen solaren Strahlung
- Stundensumme der Globalstrahlung

herausgezogen, auf Plausibilität geprüft und in das Javascript-Object hwd02925 eingefügt. In diesem Object sind die obigen Werte mit dem zugehörigem Datum (yyyymmddhh) verknüpft. Das Object hwd02925 wurde dann in die zur App gehörende Datei gswd02925.js integriert.

3. Vorbereiten der Simulation

Wird der Button „simuliere“ geklickt, beginnt die Vorbereitung der Simulation.
Die App EG6Z arbeitet intern mit UTC (Weltzeit). Die Eingaben für Anfang und Ende der Simulation werden in Millisekunden nach 1970-01-01 00:00:00 UTC umgerechnet. Sie müssen innerhalb der Zeitspanne der Wetterdaten liegen.
Für die Simulation wird auf die Eingabedaten im Sitzungsspeicher zugegriffen.
Anfangswerte für einige Variable werden gesetzt.
Die Berechnung der instationären Temperaturfelder in Außen- und Innenwänden wird vorbereitet:
Die Wärmeübergangskoeffizienten für die Oberflächen eines jeden Baukörperteils werden vereinfachend als konstant behandelt [17] und der jeweils angrenzenden Zone zugeordnet, und zwar zu Zone 0 (Umgebungsluft) und Zone 9 (Erdreich) $\alpha = 25$ W/(m²K), zu den anderen Zonen $\alpha = 7.7$ W/(m²K).
Der Wert wabe für eine Wand ist definiert als $2*\lambda/dw$ und ergibt sich aus

$$wabe = 2/(1/u - 1/ali - 1/ala) ,$$

worin

λ	mittlere Wärmeleitfähigkeit
dw	Dicke der Wand
u	U-Wert der Wand,
ali,ala	innerer bzw. äußerer Wärmeübergangskoeffizient.

Sollte der U-Wert für die Wand nicht als Zahl eingegeben worden sein, wird vereinfachend angenommen, dass die Wand aus Vollziegeln besteht und damit

$$wabe = (1.16 \text{ W/(m*K)})/dw$$

ist.
Die Schmidtzahl für eine Wand ist definiert als

$$waga = 2*a*(\Delta z)/(dw)^2 ,$$

worin

a	Temperaturleitfähigkeit,
Δz	Zeitschritt bei der Simulation.

Sie wird vereinfachend für alle Wände mit einer Temperaturleitfähigkeit von 0.0018 m²/h errechnet. Dazu wurden u.a. folgende Materialdaten berücksichtigt:

Material	Wärmeleitfähigkeit	Wärmekapazität	Temperaturleitfähigkeit
->	W /(m * K)	kWh / (m³ * K)	m² / h
Beton	2.10	0.667	0.0031
Porenbeton	0.24	0.175	0.0014
Vollziegel	0.58	0.325	0.0018
Lochziegel	0.33	0.186	0.0018
Mineralwolle	0.04	0.029	0.0014

Es wird untersucht, welche Zonen bezüglich des Luftstroms in Reihe zu einem Strang geschaltet sind und das umbaute Volumen der Stränge bestimmt.

In der App sind Hilfsprogramme enthalten:
Nach Magnus gilt für den Dampfdruck (in Pa) von Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur t (zwischen -45°C und +60°C) näherungsweise

vapor_pressure(t) = 611.2*exp(17.62*t/(243.12 + t)) .

Daraus folgt für den Taupunkt eines Wasserdampf-Luft-Gemisches

dew_point(pw) = 243.12*(ln(pw)/611.2)/(17.62 – (ln(pw)/611.2)) .

Die Enthalpie i eines Wasserdampf-Luft-Gemisches (in kWh/kmol) errechnet sich näherungsweise aus

i = enthalpy(p, pw, t) = 12.513 * mw + cv * t ,

worin mw = pw / p ,

cv = 0.00933 * mw + 0.00809 *(1 – mw) (in kWh/kmol/K) ,
p Druck im Gemisch (normal 101325 Pa),
pw Wasserdampf-Partialdruck .

Die Temperatur ergibt sich umgekehrt aus der Enthalpie i :

t = trenthalpy(p, pw, i) .

4. Ausführen der Simulation

Sind die Vorbereitungen für die Simulation abgeschlossen, wird sofort die Simulation ausgeführt.
Die aktuelle (virtuelle) Zeit schreitet mit jedem Simulationsschritt um Δz = 0.1 h = 6 Minuten = 360000 ms fort.
Zu Beginn einer jeden (virtuellen) Stunde werden folgende Daten ermittelt, die während der angebrochenen Stunde gelten:

- Wetterdaten
- Strahlung der Sonne
- Strompreis
- Nutzungssituation .

Bei jedem Simulationsschritt (d.h. nach jeweils 6 virtuellen Minuten) werden untersucht:

- Temperatur und Wasserdampf-Partialdruck in der Umgebungsluft
- solarer Wärmegewinn
- Transmissionsverluste
- Lüftung
- Gebläsekonvektoren
- Pufferspeicher der Wärmepumpen
- Temperatur und Taupunkt der Luft in den Zonen
- Malus
- Verbräuche
- Daten für Schreiber (nur am letzten Tag).

Bei jedem 3. Simulationschritt (d.h. nach jeweils 18 virtuellen Minuten) wird die Steuerung der Wärmepumpen aktualisiert.
Nach 10 Simulationsschritten wird zur nächsten (virtuellen) Stunde weiter geschaltet bis der Zeitabschnitt für die Simulation abgeschlossen ist.

4.1 Wetter

Zu Beginn einer virtuellen Stunde wird die aktuelle Zeit (UTC-Datum) im Format yyyymmddhh ermittelt und damit ein zugehöriger String im Javascript-Object hwd02925 (abgelegt in gswd02925.js). Durch Splitten dieses Strings erhält man Werte für Temperatur tU und relative Feuchte der Umgebungsluft, diffuse solare Strahlung diffsol und Globalstrahlung globsol der Sonne in dieser Stunde.
Zu Beginn einer jeden virtuellen Stunde wird aus Temperatur und relativer Feuchte der Wasserdampf-Partialdruck in der Umgebung pwdU berechnet. Zwi-

schenwerte für die Simulationsschritte werden linear interpoliert und der Taupunkt der Umgebungsluft wird bestimmt.
Es wird mittels der eingegebenen Tage für Beginn und Ende des Sommers geprüft, ob zur aktuellen Stunde die Gebäudetechnik im Sommerbetrieb arbeiten soll.

4.2 Strahlung der Sonne und solarer Wärmegewinn

Der Zenitwinkel der Sonne zewis und ihr Azimut azims (Nord: 0°; Ost: 90°) werden nach [10] für die Mitte der angebrochenen Stunde und die Wetterstation Leinefelde berechnet.
Die direkte Strahlung von der Sonne dirsol ist die Differenz zwischen Globalstrahlung globsol und diffuser solarer Strahlung diffsol. Die vom Wetterdienst veröffentlichten Stundenwerte für Solarstrahlung beziehen sich auf eine horizontale Fläche. Die App rechnet die direkte Strahlung auf die aktuelle Richtung der Sonne um (Lambertsches Kosinusgesetz [16]):

dirsol = (globsol – diffsol)/cos(zewis) , falls zewis < 1.5 .

Ist zewis > 1.5 (Sonne unterm Horizont), gelangt keine Sonnenstrahlung auf das Gebäude.

Für die vorgegebenen Gruppen der Fenster wird die auftreffende Strahlungsenergie berechnet. Es wird zunächst das innere Produkt ip der Vektoren Fensternormale (definiert durch deren Azimut azbt und Zenitwinkel zebt) und Sonnenstrahl zum Fenster (definiert durch Azimut azims und Zenitwinkel zewis der Sonne) berechnet:

ip = sin(zebt)*sin(zewis)*cos(azbt-azims) + cos(zebt)*cos(zewis) .

Dieses ist der Kosinus des kleinsten Winkels zwischen den beiden Vektoren. Er gibt im Lambertschen Kosinusgesetz für Wärmestrahlung näherungsweise das Verhältnis der Energieübertragung bei schrägem Strahlungseinfall gegenüber senkrechtem an [16]. Falls das innere Produkt kleiner als cos(79°) = 0.19 ist, strahlt die Sonne auf das Fenster extrem seitlich bzw. von hinten, dann wird keine richtungsabhängige Energieübertragung angenommen (ip = 0).
Die Energie der Sonnenstrahlung bezogen auf die Fläche der Fenster einer Gruppe bt ergibt sich dann aus

wSol[bt] = dirsol*ip + diffsol .

Für die konventionellen Fenster wurde der g-Wert als Konstante gwert eingegeben.
Sollte eine Fenstergruppe mit dimmbarem Sonnenschutzglas (SageGlass Climatop Classic 42.1EC-12-4-12-4 [4]) ausgerüstet sein, soll gelten:

- Glasanteil eines Fensters 71%
- die Dimmung ist für alle Fenster einer Gruppe gleich
- liegt die Umgebungstemperatur unter 5°C oder die Energie der Sonnenstrahlung auf die Fenstergruppe wSol[bt] unter 40 W/m² wird die Gruppe nicht gedimmt, dim60 = 0.36 ist der Sollwert für die Dimmung
- liegt die Umgebungstemperatur über 5°C und die Energie der Sonnenstrahlung auf die Fenstergruppe zwischen 40 W/m² und 120 W/m², ist der Sollwert für die Dimmung dim60 = 0.09
- liegt die Umgebungstemperatur über 5°C und die Energie der Sonnenstrahlung auf die Fenstergruppe zwischen 120 W/m² und 200 W/m², ist der Sollwert für die Dimmung dim60 = 0.05
- liegt die Umgebungstemperatur über 5°C und die Energie der Sonnenstrahlung auf die Fenstergruppe über 200 W/m², ist der Sollwert für die Dimmung dim60 = 0.03
- dim00 = dim60 aus der vorhergehenden Stunde
- in der aktuellen Stunde ist
  gwert = 0.71*((1 – φ)*dim00 + φ*dim60) ,
  worin
  φ = 0.00, 0.30, 0.55, 0.75, 0.90, 0.95, 0.97, 0.98, 0.99 oder 1.00
  für den betreffenden Zeitschritt von 6 Minuten gilt .

Die Sonnenenergie, die transparente Bauteile (Fenster) in eine Zone durchlassen, ist der solare Wärmegewinn der Zone. Er errechnet sich für jeden Simulationsschritt als Summe wsol[zone] des solaren Wärmegewinns der Fenstergruppen der Zone

```
      solgewBt = gwert * fl[bt] * wSol[bt] ,
worin gwert       g-Wert der Fenster der Fenstergruppe bt,
      fl[bt]      Fläche der Fenster der Gruppe bt.
```

Die Summe der solaren Gewinne aller Zonen ist der solare Gewinn des Gebäudes wSog .

4.3 Nutzungssituation

Aus der aktuellen UTC-Zeit der Simulation werden die Uhrzeit nach MEZ bzw. MESZ und der Wochentag errechnet. Damit erhält man aus den Nutzungsplänen der Zonen zunächst das Nutzungsprofil und daraus ergeben sich aktuelle Werte für die Zonen für

- Zahl der Personen
- Aktivität der Personen (met)
- Wasserdampfmenge von Personen (kmol/h)
- Wärmeabgabe von Personen (kW)
- erforderliche Frischluft für Personen (kmol/h)
- unterer und oberer Sollwert für die Lufttemperatur (°C)
- Elektroenergieverbrauch für Warmwasserbereitung (kW)
- Elektroenergieverbrauch von Geräten (kW)
- Elektroenergieverbrauch durch Beleuchtung (kW) .

Nach [15] werden von jedem Erwachsenen etwa

- 0.0015 kmol/h/met an Wasserdampf (mit 27°C) an die Raumluft abgegeben
- 12765*0.0015 W/met als (feuchte) Wärme an die Raumluft abgegeben
- 57 W/met als (trockene) Wärme an die Raumluft abgegeben
- 0,79 kmol/h/met an Frischluft benötigt.

Eine Person mit der Aktivität 1 met (ruhig liegend) benötigt also etwa 19 m³/h an Frischluft.
Der Elektroenergieverbrauch der Durchlauferhitzer errechnet sich einfach aus der Energie, die zum Aufheizen der Trinkwarmwassermenge von Erdreichtemperatur 10°C auf 42°C benötigt wird. Er wird über alle Zonen zu wTWW aufsummiert.
Nur wenn der aktuelle Zenitwinkel der Sonne zewis > 1.57 (> 90° : Sonne unterm Horizont) beträgt, ist die nächtliche Beleuchtung eingeschaltet.
Der interne Wärmegewinn wintern[zone] einer Zone summiert sich aus

- Elektroenergieverbrauch von Geräten
- Elektroenergieverbrauch durch Beleuchtung
- Wärmeabgabe von Personen .

Er wird über alle Zonen zu wInt aufsummiert.
Über die aktuelle Uhrzeit nach MEZ bzw. MESZ wird der Arbeitspreis für elektrischen Strom bestimmt.

4.4 Transmission

Jede Wand wird in grober Näherung als eine homogene Schicht mit instationärem Temperaturfeld behandelt.
Das Temperaturfeld jeder Wand wird gekennzeichnet durch

```
t[0]  Temperatur der äußeren Zone,
t[1]  Temperatur der äußeren Oberfläche der Wand,
t[2]  Temperatur in der Mitte der Wand,
t[3]  Temperatur der inneren Oberfläche der Wand,
t[4]  Temperatur der inneren Zone .
```

Die Temperatur der Zone 0 ist die Temperatur der Umgebungsluft tU, die Temperatur der Zone 9 (Erdreich) wird vereinfachend mit 10°C angesetzt. Die Temperatur der anderen Zonen ist tG[zone].

Wärmebilanzen liefern einen Algorithmus für die schrittweise, näherungsweise Berechnung des Temperaturfeldes der Wand (analog zur Methode von Schmidt, [16]) und damit für deren Transmissionsverlust:
Der Wärmestrom durch die äußere bzw. innere Oberfläche nach außen ist

```
qa = ala*(t[1] – t[0]) = λ/(dw/2) *(t[2] – t[1])    bzw.
qi = ali*(t[4] – t[3]) = λ/(dw/2) *(t[3] – t[2])      ,
```

worin

```
ala   Wärmeübergangskoeffizient außen,
ali   Wärmeübergangskoeffizient innen,
λ     Wärmeleitfähigkeit der Wand,
dw    Dicke der Wand.
```

Daraus folgt

```
t[1] = (ala*t[0] +  wabe*t[2])/(ala + wabe)  und
t[3] = (ali*t[4] +  wabe*t[2])/(ali + wabe) ,
```

worin

```
wabe = 2*λ/dw    (s. 3.).
```

Die Differenz zwischen qi und qa bewirkt ein Erhöhung der mittleren Wandtemperatur um

```
(qi – qa)*Δz/(cv*dw) ,
```

woraus nach einem Simulationsschritt folgt

```
t[2] = t[2] + waga*(t[1] – 2*t[2] + t[3]) ,
```

worin

```
cv    volumenbezogene Wärmekapazität der Wand,
waga  Schmidtzahl der Wand (s. 3.).
```

Die Wärmeströme qa bzw. qi werden mit der zugehörigen Wandfläche multipliziert, die so erhaltenen Transmissionverluste werden der äußeren bzw. inneren Zone zugeordnet und aufsummiert.

Für Fenster wird ein quasistationäres Temperaturfeld unterstellt.
Eingespeichert sind die U-Werte u der nicht dimmbaren Fenster; der U-Wert dimmbarer Fenster wird mit u = 0.86 W/(m²*K) angesetzt. Der spezifische Transmissionswärmeverlust eines Fensters ist

```
q = u * (tG[zone] – tU) .
```

Die spezifischen Transmissionswärmeverluste werden mit der entsprechenden Fensterfläche multipliziert, die so erhaltenen Transmissionverluste werden der Zone zugeordnet und aufsummiert.

Der Transmissionswärmeverlust einer Zone ist wtrans[zone], der Transmissionswärmeverlust des Gebäudes wTrgp ist die Summe der Verluste für die Zonen 1 bis 6.

4.5 Lüften

Jeder Abluftventilator ermöglicht einen Durchsatz von

```
almin = (0.2/h) * vlstrang bis
almax = (4.0/h) * vlstrang,
```

worin

```
vlstrang    Luftmenge in den zum Strang gehörenden Zonen (kmol).
```

Die Lüftung soll in jedem Strang die erforderliche Frischluftmenge alp für die Personen liefern, die sich in den zum Strang gehörigen Zonen befinden (s. 4.3).
Sollte die Temperatur in einer Zone eines Strangs sowohl über ihrer (gemittelten) Solltemperatur als auch über der Temperatur der Umgebungsluft tU liegen, kann die Lüftung zur Kühlung beitragen. Die dafür eingesetzte Luftmenge sei

```
alc = zvol * rabt / (tG[zone] – tU) /  Δz ,
```

worin

```
zvol  umbauter Raum der Zone,
rabt  = tG[zone] - 0.5*tSollu[zone] – 0.5*tSollo[zone] .
```

Die zu fördernde Abluftmenge al eines Strangs wird zunächst auf alp , die erforderliche Frischluftmenge, gesetzt. Sollte diese kleiner als alc sein, wird al = alc . Sollte al kleiner als almin sein, wird al = almin . Sollte al größer als almax sein, wird al = almax . Schließlich wird (um Schwingungen einzuschränken) das Mittel von al und dessen Wert im vorhergehenden Simulationsschritt als Fördermenge al dem Abluftventilor des Strangs vorgegeben.
Der Lüftungsverlust einer Zone ist

wLueft[zone] = al*(hAB – hZU) ,

worin

hAB = i(101325,pdw[zoAB],tG[zoAB]) Enthalpie der Luft aus der Zone,
hZU = i(101325,pdw[zoZU],tG[zoZU]) Enthalpie der Luft in die Zone .

Der Verlust an Wasserdampf der Zone ist

fLueft[zoAB] = al*(pdw[zoAB] – pdw[zoZU])/(101325 Pa).

Der Elektroenergieverbrauch des Abluftventilators des Strangs k wird geschätzt auf [13]

elAV[k] = (0.0067 kW/kmol/h)*almax*(0.1 + 0.9*al/almax) .

4.6 Gebläsekonvektoren

Durch jeden Konvektor GK-VB043 strömen in Stufe 1 (MIN), 2 (MED) oder 3 (MAX) 744 l/h Wasser und mum[s] = 16.2, 24.3 oder 30.3 kmol/h Umluft. Das Gebläse für die Umluft verbraucht elm[s] = 55, 75 oder 95 W. In Stufe 0 (AUS) strömt kein Wasser durch den Konvektor (2-Wege-Ventil im Rücklauf geschlossen), das Gebläse läuft in Stufe 1.
Der Wärmdurchgangswiderstand der Gebläsekonvektoren wird aus Herstellerdaten errechnet [7,16].

Im Heizbetrieb überträgt ein Gebläsekonvektor die Wärmemenge

difen[s] = zlkh[s] * (tP - tG[zone]) ,

worin

difen[s]	Enthalpiedifferenz der Umluft zwischen Ein- und Austritt in Stufe s = 0, 1, 2 oder 3 ,
tP	Temperatur im zentralen Wasserspeicher,
zlkh[s]	= 0.000, 0.113, 0.157 oder 0.184 kW/K Wärmdurchgangswiderstand beim Heizen in Stufe 0, 1, 2 oder 3.

Im Kühlbetrieb soll idealisierend die Kondensation von Wasserdampf aus der Umluft ohne Widerstand erfolgen.
Im Kühlbetrieb überträgt ein Gebläsekonvektor die sensible Wärmemenge

wsens[s] = zlkk[s] * (tG[zone] - tP) ,

worin

zlkk[s]	= 0.000, 0.108, 0.149 oder 0.171 kW/K Wärmdurchgangswiderstand beim Kühlen in Stufe 0, 1, 2 oder 3.

Die Austrittstemperatur der (gekühlten) Umluft ist folglich

ta[s] = tG[zone] - wsens[s] / mum[s] / (0.0081 kWh/kmol/K) .

Die gegebenenfalls abgeschiedene Wassermenge ist je Gebläsekonvektor

f[s] = mum[s] * (pwdG[zone] – pS)/pU ,

worin

mum[s]	Menge der Umluft,
pS	= vp(ta[s]),falls vp(ta[s]) < pwdG[zone], sonst pwdG[zone],
vp	Sättigungsdruck von Wasser,
pU	Luftdruck (101325 Pa).

Die je Gebläsekonvektor aus der Zone abgeführte Wärmemenge ergibt sich aus

difen[s] = mum[s] * enthalpy(101325, pwdG[zone], tG[zone])
- (mum[s] - f[s]) * enthalpy(101325, pS, ta[s])
- f[s] * (0.021 kWh/kmol/K) * ta[s] .

Die zGK Gebläsekonvektoren einer Zone werden abhängig vom Bedarf der Zone geschaltet.
Die Wärmemenge Qv, die aktuell der Zone entzogen wird, ergibt sich aus

- Transmissionswärmeverlust
- plus Lüftungsverlust
- minus solarer Wärmegewinn
- minus Elektroenergieverbrauch von Geräten und Beleuchtung
- minus Wärmeabgabe von Personen.

Die Regelabweichung rab bei der Regelung der Temperatur der Luft in der Zone wird definiert zu

rab = 0.3*tSollu[zone] + 0.7*tSollo[zone] - tG[zone] im Sommer, sonst
rab = 0.7*tSollu[zone] + 0.3*tSollo[zone] - tG[zone] .

Die Wärmemenge wrat zum Ausgleich der Verluste und zur 30%igen Beseitigung der Regelabweichung beläuft sich auf

wrat = Qv + 0.30*((0.00809 kWh/kmol/K)*zvol[zone])*rab/Δz .

Für den Fall, dass im Sommer wrat < 0 und (tG[zone] – tP) > 1 , ermittelt die App nun für alle Schaltstufen, welche Wärmemenge difen[s] übertragen werden kann und welche Kondensatmenge f[s] dabei anfällt. Anschließend berechnet sie, wie viele Konvektoren in den Stufen 0, 1, 2 oder 3 arbeiten müssen, damit sie zusammen möglichst genau die Wärmemenge wrat übertragen und höchstens in einer Schaltstufe differieren.
Für den Fall, dass im Sommer Qv > 0, werden in anzeh[zone] Gebläsekonvektoren von zGK[zone] die Elektroheizregister (2 kW) eingeschaltet, die Umluftventilatoren in Stufe 3 geschaltet und der Wasserdurchfluss unterbrochen (und die restlichen Konvektoren ausgeschaltet). Dabei soll gelten

anzeh[zone] = Math.round(zGK[zone]*(tSollu[zone] + 1 – tG[zone])/2),
0 <= anzeh[zone] <= zGK[zone] .

Für den Fall, dass außerhalb des Sommers wrat > 0 und (tP - tG[zone]) > 2 , ermittelt die App für alle Schaltstufen, welche Wärmemenge difen[s] übertragen werden kann und berechnet, wie viele Konvektoren in den Stufen 0, 1, 2 oder 3 arbeiten müssen (analog zum Kühlbetrieb, s.o.).

Die von den Gebläsekonvektoren übertragene Wärme wGK[zone] (vorzeichenbehaftet), die von ihnen abgeschiedene Wassermenge fGK[zone] und die von ihnen verbrauchte Strommenge elGK[zone] erhält man aus der Zahl der in die jeweilige Stufe geschalteten Konvektoren multipliziert mit den zugehörigen Werten von difen[s], f[s] und elm[s].
Die Summe von wGK[zone] über alle Zonen sei wgkzk. Von der im Gebäude übertragenen Wärme wird der laufende Mittelwert

mwgkhk = 0.9*mwgkhk + 0.1*wgkzk

berechnet.
Die Summe aller Wärmemengen, die einer Zone zugeführt werden, sei

wGKs[zone] = wGK[zone] + elGK[zone] + (2.0 kW)*anzeh[zone] .

4.7 Wärmepumpen und Speicher

Die eingesetzten zWP reversiblen Luft-Wasser-Wärmepumpen vom Typ Wolf CHA-16/20-400V-M2 CS-e9-C2 [3] nutzen das Kältemittel R290. Sie arbeiten mit Spreizungsregelung, so dass die Temperaturen von Vor- und Rücklauf um 5 K differieren.
Die App verwendet Herstellerdaten für die (maximale und minimale) Kühl- bzw. Heizleistung und Leistungsaufnahme in Abhängigkeit von Umgebungslufttemperatur tU und Temperatur des Wassers im angeschlossenen Speicher tP. Zwischen ausgewählten Daten wird linear interpoliert.

Für den Kühlbetrieb im Sommer ((tU > 10) && (tU < 45)) wurde der Sollwert für die Speichertemperatur tPsoll mit 12°C, 15 °C oder 18°C gewählt.
Nach jeweils 3 Simulationschritten (18 Minuten) wird die Leistung der Wärmepumpen aktualisiert:
Die Kühlleistung aller Wärmepumpen soll erreichen

wrak = -((1.1545 kWh/m³/K)*volsp*(tPsoll - tP)/(3*Δz) + mwgkzk) ,

worin
volsp Volumen des Pufferspeichers .
Gilt für die letzte Wärmepumpe wrak >= wWPkmin, so wird diese zum Kühlen eingeschaltet. Die Auslastung der Wärmepumpe ist definiert mit
r = (wrak - wWPkmin)/(wWPkmax – wWPkmin) ,
worin
wWPkmax maximale Kühlleistung je Wärmepumpe (abhängig von tU und tP),
wWPkmin minimale Kühlleistung je Wärmepumpe (abhängig von tU und tP).
Ist r > 1, wird r = 1 gesetzt. Die Drehzahl der letzten Wärmepumpe wird so gesteuert, dass gilt
wWPk = (1-r)*wWPkmin + r*wWPkmax und
elWP = (1-r)*pWPkmin + r*pWPkmax ,
worin
wWPk Kühlleistung,
pWPkmax maximale Leistungsaufnahme der Wärmepumpe (tU, tP),
pWPkmin minimale Leistungsaufnahme je Wärmepumpe (tU, tP),
elWP Leistungsaufnahme.
Anschließend wird wrak um wWPk vermindert; ist dieser neue Wert von wrak größer als wWPkmin, wird die vorletzte Wärmepumpe (falls vorhanden) zum Kühlen eingeschaltet und dem aktualisierten Wert r entsprechend wWPk (sowie elWP) gesteuert. Analog wird verfahren bis zur ersten Wärmepumpe.

Für den Heizbetrieb außerhalb des Sommers ((tU > -22) && (tU < 40)) wird der Sollwert für die Speichertemperatur tPsoll mit 32°C, 35 °C oder 38°C gewählt. Unter gewissen Bedingungen (s.u.) kann Eis auf den Verdampfern der Wärmepumpen abgelagert werden und die Heizleistung mindern. Ist das der Fall, müssen diese Wärmepumpen in bestimmtem Intervallen durch Kreislaufumkehr aktiv abgetaut werden. Der Abtauvorgang erstreckt sich über 3 Simulationsschritte (18 Minuten), wobei die mittlere Kühlleistung einer abtauenden Wärmepumpe mit 12 kW (bei Leistungsaufnahme 2 kW) angenommen wird.
Die Heizleistung aller nicht abtauenden Wärmepumpen soll erreichen
wrah = (1.1545 kWh/m³/K)*volsp*(tPsoll - tP)/(3*Δz) + mwgkzk + wWPa ,
worin
volsp Volumen des Pufferspeichers
wWPa Kühlleistung der abtauenden Wärmepumpen .
Gilt für die erste nicht abtauende Wärmepumpe wrah >= wWPhmin, so wird diese zum Heizen eingeschaltet. Die Auslastung der Wärmepumpe ist definiert mit
r = (wrah - wWPhmin)/(wWPhmax – wWPhmin) ,
worin
wWPhmax maximale Heizleistung je Wärmepumpe (abhängig von tU und tP),
wWPhmin minimale Heizleistung je Wärmepumpe (abhängig von tU und tP).
Ist r > 1, wird r = 1 gesetzt. Die Drehzahl der ersten nicht abtauenden Wärmepumpe wird so gesteuert, dass gilt
wWPh = ef*((1-r)*wWPhmin + r*wWPhmax) und
elWP = (1-r)*pWPhmin + r*pWPhmax ,
worin
wWPh Heizleistung,
ef Eisfaktor der Wärmepumpe (s.u.),
pWPhmax maximale Leistungsaufnahme der Wärmepumpe (tU, tP),
pWPhmin minimale Leistungsaufnahme je Wärmepumpe (tU, tP),
elWP Leistungsaufnahme.
Anschließend wird wrah um wWPh vermindert; ist dieser neue Wert von wrah größer als wWPhmin, wird die zweite nicht abtauende Wärmepumpe (falls vorhanden) zum Heizen eingeschaltet und dem aktualisierten Wert r entsprechend wWPh (sowie elWP) gesteuert. Analog wird verfahren bis zur letzten Wärmepumpe.
Es wird überprüft, ob und wie stark die nicht abtauenden Wärmepumpen vereisen: Die Temperatur der Verdampfer-Oberfläche wird grob geschätzt zu
tempVO = tU - (6.0*(1-r) + 10.0*r) .

Wenn die aktuelle Temperatur der Verdampfer-Oberflächen unter 0°C und dem aktuellen Taupunkt der Umgebungsluft liegen, nimmt der Eisfaktor ef schätzungsweise nach 3 Simulationschritten um

(0.0004 /Pa/h)*(pwdU - vp(tempVO))*(3*Δz)

ab.
Wenn die aktuelle Temperatur der Verdampfer-Oberflächen über 0°C liegt, nimmt ef schätzungsweise nach 3 Simulationschritten um

(0.08/K/h)*(tU – 0)*(3*Δz)

zu.
Es gilt 0 <= ef <= 1 .
Sinkt der Eisfaktor einer Wärmepumpe unter 0.8 , muss dies Wärmepumpe abgetaut werden. Nach dem Abtauen ist der Eisfaktor wieder 1.0 .

Für den Fall, dass die Temperatur im Speicher außerhalb des Sommers 5 K unter ihren Sollwert sinkt, werden die Elektroheizelemente aller Wärmepumpen eingeschaltet, d.h. wWPe = (9.0 kW)*zWP . Erreicht die Temperatur im Speicher wieder 3 K unter ihrem Sollwert, werden sie ausgeschaltet. Dies wird nach jedem Simulationschritt geprüft.

Die aktuelle Temperatur im Speicher ergibt sich nach dem Simulationsschritt Δz näherungsweise zu
tP = tP + (wWPh + wWPe - wWPa - wWPk – wgkzk)*Δz/((1.155 kWh/m³/K)*volsp) ,
worin

wWPh	aktuelle Heizleistung der Wärmepumpen (im Sommer stets 0),
wWPe	aktuelle Zusatzheizleistung der Wärmepumpen (im Sommer 0),
wWPa	aktuelle Abtauleistung der Wärmepumpen (im Sommer stets 0),
wWPk	aktuelle Kühlleistung der Wärmepumpen (im Winter stets 0),
wgkzk	aktuelle Heizleistung (bzw. -negativ- Kühlleistung) aller Gebläsekonvektoren.

4.8 Zustand der Luft in den Zonen

In die Zonen des Gebäudes wird Wasser eingebracht :

- Wasserdampf von Personen
- minus Verlust an Wasserdampf durch Lüftung
- minus Kondensatanfall in Gebläsekonvektoren.

Die Menge an Wasserdampf in einer Zone erhöht sich also um
f[zone] = fPerson[zone] – fLueft[zone] – fGK[zone] .

In die Zonen des Gebäudes wird Wärme eingebracht :

- Wärmezufuhr (oder Wärmeabfuhr) von Gebläsekonvektoren
- plus solarar Wärmegewinn
- plus interner Wärmegewinn (von Geräten, Beleuchtung, Personen)
- minus Transmissionswärmeverlust
- minus Lüftungsverlust .

Einer Zone werden an Wärme also zugeführt
bilanz[zone] = wGKs[zone] + wsol[zone] + wintern[zone]
- wtrans[zone] – wLueft[zone] .
Damit erhöht sich die Enthalpie der Luft in der Zone nach dem Simulationsschritt auf
en[zone] = enthalpy(101325,pwdG[zone],tG[zone]) + bilanz[zone]*Δz/zvol[zone].
Der Wasserdampfpartialdruck in der Zone ergibt sich nach dem Simulationsschritt zu

pwdG[zone] = pwdG[zone] + f[zone]*Δz/zvol[zone]*(101325 Pa) .

Mit der Umkehrfunktion von enthalpy, trenthalpy(101325,pwdG[zone],en[zone]), (und exponentieller Glättung mit Gegenwartsfaktor 0.7 [11]) erhält man die Temperatur in der Zone tG[zone] nach dem Simulationsschritt.
Mit der Funktion dew_point(pwdG[zone]) wird der Taupunkt für die Luft in der Zone berechnet.

4.9 Malus und Verbräuche

Für eventuelle Abweichungen von den gewünschten Temperaturbereichen der Zonen vergibt die App bei dem betroffenen Simulationsschritt einen Malus (wie Mietminderung).
Liegt die Temperatur in einer Zone unter tSollu[zone] oder über tSollo[zone], ist der Malus

(0.02 €/(kmol*h*K)) * zvol[zone] * abwT[zone] * Δz ,

worin

abwT[zone] Abweichung von tG[zone] von der entsprechenden Grenze.

Die Mali in den Simulationsschritten werden über die Simulationsdauer aufsummiert.
Über die Simulationsdauer aufsummiert werden auch Verbrauch und Kosten für Strom für das Gebäude, Stromverbrauch der Wärmepumpen, Durchlauferhitzer und andere interessante Werte.

5. Ergebnisse der Simulation

Einige über die gesamte Simulationsdauer gemittelte Werte werden angezeigt. Ausgewählte Werte für den letzten Tag der Simulation werden von einem Linienschreiber vorgestellt (Zeitangaben in UTC).

6. Erfahrungen und Folgerungen

Die Gebäudetechnik für diese App ist bewußt relativ einfach und kostengünstig geplant. Es wird auf Wärmerückgewinnung bei der Lüftung, auf Trink-Warmwasser-Erwärmung mittels Wärmepumpen und auf häufige Umschaltung der Wärmepumpen verzichtet. Mit dieser Gebäudetechnik ist Behaglichkeit in einem Gebäude möglich.

Für das probeweise genutzte Beispiel (Entwurfsvariante für die Turnhalle der Heineschule in Jena; s. 7.) wurde zur Simulation für den Zeitraum 01.01.2021 bis 31.12.2024 eine Rechenzeit von 5 Minuten gebraucht. Die App EF6Z lief hierbei im Browser Google Chrome 133 auf einem PC mit 64-Bit-Betriebssystem Windows 11 Home 24H2 und Prozessor AMD 3020e.

Stand 14.02.2025 .

7. Quellen und Anlagen

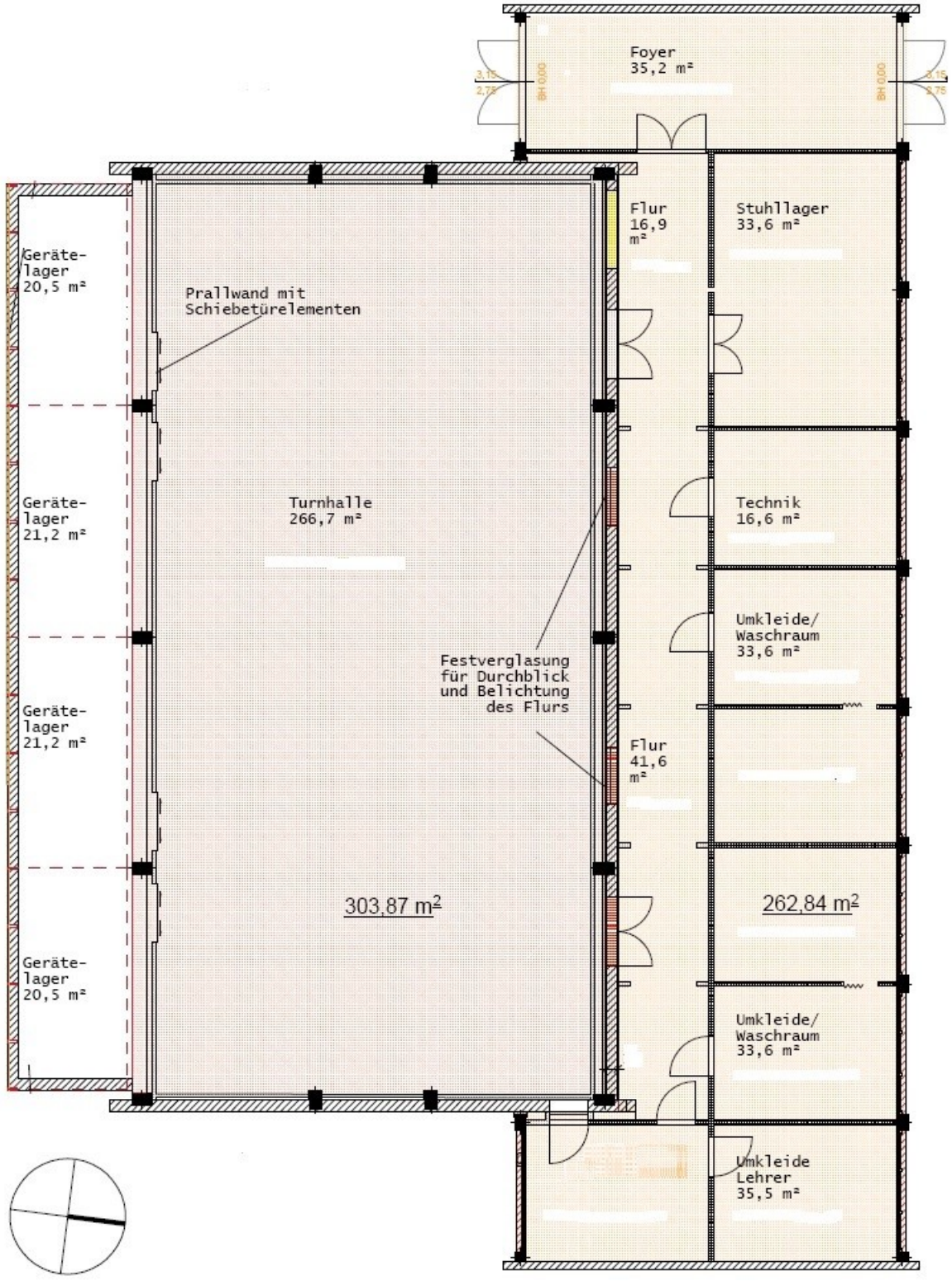
[1] Firebase
https://firebase.google.com
[2] Deutscher Wetterdienst, Climate Data Center
https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/hourly/
[3] WOLF GmbH, 84048 Mainburg
https://www.wolf.eu/de-de
[4] SageGlass:Vetrotech Saint-Gobain International AG, 3175 Flamatt/Schweiz
https://sageglass.com/de/produkte/sageglass
[5] CLAGE GmbH, 21337 Lüneburg
https://www.clage.de/
[6]

[7] Swegon Germany GmbH, 85748 Garching
https://www.swegon.com/de/
[8] https://de.wikipedia.org/wiki/Metabolisches_Äquivalent
[9] Novafeel GmbH, 37124 Rosdorf
https://www.novafeel.de/ernaehrung/met-metabolische-aeqivalent.htm
[10] https://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenstand
[11] https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Exponentielle_Glättung&oldid=220747293
[12] NOAA|Earth System Research Laboratory|GMD
https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/solareqns.PDF
[13] Gebäudeenergiegesetz – GEG vom 08.08.2020
https://www.gesetze-im-internet.de
[14]

[15] Mayer,U., Bauphysik für die Praxis, Thermische Behaglichkeit
http://www.jade-hs.de/fachbereiche/architektur/lesen/downloads/vorlesungsskripte-uwe-mayer/
(daraus 2014 kopiert Tabelle 1; s. nächste Seite)
[16] М.А.Михеев, И.М.Михеева
Основы теплопередачи, Издат.“Энергия“, Москва 1973
[17] Auszug aus den Tabellen und Formeln der DIN EN ISO 6946 : 1996-11
https://www.uni-due.de/ibpm/Aufgabensammlung/NeuNorm_A4.pdf

Tabelle 1: Wärmehaushalt des Menschen (Richtwerte)

Richtwerte zum menschlichen Wärmehaushalt (Angaben für 1 Person)		Art der Betätigung									
		völlige Ruhe ruhiges Liegen		geringe Betätigung in Ruhe sitzen		leichte Arbeit		leichte körperliche Arbeit		schwere körperliche Arbeit	
		Grund-umsatz	Grund-umsatz	Tisch-spiele	Lesen	Schule	Büro	Gymnastik	Hausfrau	Ball-spielen	Hand-werker
		Kinder	Er-wachsene	Kinder	Er-wachsene	Kinder	Er-wachsene	Kinder	Er-wachsene	Kinder	Er-wachsene
Erforderlicher Energieverbrauch je Tag	kJ/d	5.900	7.500	8.000	9.700	8.800	10.500	10.100	12.600	11.300	14.700
	kcal/d	1.410	1.790	1.910	2.320	2.100	2.510	2.410	3.010	2.700	3.510
	kWh/d	1,6	2,1	2,2	2,7	2,4	2,9	2,8	3,5	3,1	4,1
Gesamtwärmeabgabe (einschl. Verdunstung)	W	50-65	65-85	60-80	75-100	100-130	125-170	170-225	215-295	280-380	360-490
davon trockene Wärmeabgabe (Konvektion, Leitung und Strahlung)	W	35-45	50-65	45-60	60-75	70-95	95-130	120-160	165-220	200-275	280-370
Wasserdampfproduktion je Stunde	g/h	21-28	23-32	25-34	27-38	41-57	46-62	70-95	78-108	117-160	130-180
Sauerstoffbedarf je Stunde	l/h	9-12	12-16	10-14	14-19	17-24	24-32	30-41	40-51	50-68	65-90
ausgeatmetes Kohlendioxid je Stunde (Konzentration in der Luft 0,03-0,05 Vol.%)	l/h	7-10	10-13	9-12	12-16	15-20	19-26	25-34	32-43	46-56	55-75
Frischluftraten, erforderlich wenn CO_2 max. 0,10 Vol.%	m³/h	12-17	17-21	15-20	20-26	25-33	32-42	42-57	55-72	70-93	90-130
Schwülegrenze bei angegebenen Raumluft-Temp.	°C	28		26		24		21,5		19,5	
Gleichgewicht = Behaglichkeit	°C	24		22		20,5		19		17	
Grenze des Kühleempfindens	°C	18		17		16		15,5		14,5	

Mayer,U., Bauphysik für die Praxis, Thermische Behaglichkeit

Entwurfsvariante für die Turnhalle der Heineschule in Jena (Grundriss)