



Julian Bischof^{*2,3} und Simon Knoll^{1,2}

Stand: 24.07.2023

Das vorliegende Dokument beinhaltet unter anderem Auszüge der am Institut Wohnen und Umwelt (IWU) angefertigten Masterarbeit „Datenbasierte Modellierung des Raumwärme- und -kältebedarfs von Nichtwohngebäuden“ von Simon Knoll, betreut am IWU von Julian Bischof. Die Masterarbeit wurde im Dezember 2020 am Fachgebiet Energie & Ressourcenmanagement der Technischen Universität Berlin eingereicht.

Die nachfolgende Dokumentation wird analog zum DIBS ständig weiterentwickelt und auf den neusten Stand gebracht und dient als Ergänzung zum Wiki des DIBS-Repository. Das erste Kapitel dieses Dokuments stellt das dynamisch vereinfachte Stundenverfahren der DIN EN ISO 13790 vor. Die daran anknüpfende Vorstellung der Simulationsumgebung RC_BuildingSimulator dient als Ausgangspunkt zur Beschreibung der an ihr vorgenommenen Veränderungen. Dieser, an die Möglichkeiten des Projekts ENOB:dataNWG angepassten Simulationsumgebung (DIBS), ist zur Generierung der Eingangsparameter ein Datenverarbeitungsprozess vorangestellt, dessen Methodik in den darauffolgenden Kapiteln 3 (zur Simulation mit Daten der Tiefenerhebung) und 4 (mit Daten der Breitenerhebung) vorgestellt werden.

* Ansprechpartner (j.bischof@iwu.de)

¹ Technische Universität Berlin, Fachgebiet Energie- und Ressourcenmanagement, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin

² Institut Wohnen und Umwelt, Forschungseinrichtung des Landes Hessen und der Stadt Darmstadt, Rheinstraße 65, 64295 Darmstadt

³ Dublin Energy Lab and School of Civil and Structural Engineering, Technological University Dublin, Dublin, Ireland

Der **DIBS – Dynamic ISO Building Simulator** wurde im Rahmen des Projekts ‘ENOB:DataNWG Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude’ (www.datanwg.de) und dem Projekt ‘FlexGeber - Demonstration von Flexibilitätsoptionen im Gebäudesektor und deren Integration in das Energiesystem in Deutschland’ am Institut Wohnen und Umwelt (IWU) in Darmstadt entwickelt.

ENOB:DataNWG

Förderkennzeichen: Fkz.: 03ET1315

Projektlaufzeit: 01.12.2015 bis 31.05.2021

FlexGeber

Förderkennzeichen: Fkz.: 03EGB0001

Projektlaufzeit: 01.10.2017 bis 31.07.2022

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie**



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abbildungsverzeichnis | i |
| Abkürzungsverzeichnis | ii |
| 1 Grundlagen zur Ermittlung des Raumwärme- und -kältebedarfs | 1 |
| 1.1 Vereinfachtes Stundenverfahren im 5R1C – Netzwerk | 1 |
| 2 Modellimplementierung zur Simulation eines Gebäudebestands | 8 |
| 2.1 Umsetzung im RC_BuildingSimulator | 8 |
| 2.2 Adaption der Simulationsumgebung | 12 |
| 2.2.1 Anpassungen zur Simulation eines Gebäudebestands und Ergänzung der Eingangsparameter | 12 |
| 2.2.2 Auflösung örtlicher Beschränkungen und Dynamisierungen | 13 |
| 2.2.3 Anpassung der solaren Gewinne | 19 |
| 2.2.4 Möglichkeit einer Nachtlüftung | 19 |
| 2.2.5 Anpassung des Lüftungswärmetransferkoeffizienten | 21 |
| 2.2.6 Anpassung des Transmissionswärmetransferkoeffizienten | 22 |
| 2.2.7 Erweiterung der Erzeuger- und Übergabesysteme | 23 |
| 2.2.8 Abschätzung des stündlichen Warmwasserbedarfs | 24 |
| 2.2.9 Berechnung der Treibhausgasemissionen | 25 |
| 2.2.10 Primary Energy Calculation | 25 |
| 2.2.11 Calculation of the energy demand based on heating values | 25 |
| 3 Validierung der Simulationsumgebung DIBS | 26 |
| 3.1 Erzeugung der Eingangsparameter aus Daten der Tiefenerhebung | 26 |
| 3.2 Gegenüberstellung des berechneten Bedarfs und des gemessenen Verbrauchs . . | 41 |
| 4 Zur Berechnung des Raumwärme- und -kältebedarfs des deutschen Nichtwohnge- bäudebestands | 42 |
| 4.1 Erzeugung der Eingangsparameter aus Daten der Breitenerhebung | 43 |
| Literatur | 49 |
| Anhang | 56 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Thermisches Ersatzschaltbild 5RC1-Netzwerk | 3 |
| 2.1 | Allgemeiner Ablauf einer Gebäudesimulation | 9 |
| 2.2 | Personenbelegungsprofil Gruppen-, Einzelbüro | 17 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------------------|--|
| CEA | City Energy Analyst |
| COP | Coefficient of Performance |
| DIBS | Dynamic ISO Building Simulator |
| DWD | Deutscher Wetterdienst |
| EBF | Energiebezugsfläche |
| EER | Energy Efficiency Ratio |
| EPW | EnergyPlus Weather |
| IWU | Institut Wohnen und Umwelt |
| IÖR | Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung |
| RLT-Anlage | Raumlufttechnische Anlage |
| TEK | Teilenergiekennwerte |
| TRY | Test Reference Year |
| TMY | Typical Meteorological Year |

Kapitel 1

Grundlagen zur Ermittlung des Raumwärme- und -kältebedarfs

1.1 Vereinfachtes Stundenverfahren im 5R1C – Netzwerk

Zwischen den thermodynamischen Größen der Bauphysik und den Größen der Elektronik besteht eine Analogie nach der in Anlehnung zum elektrischen Ersatzschaltbild die am Gebäude stattfindenden Wärmetransportvorgänge mithilfe eines thermischen Netzwerks veranschaulicht werden können. Infolgedessen entspricht die elektrische Spannung der Temperaturdifferenz, der elektrische Strom dem Wärmestrom, der ohmsche Widerstand dem thermischen Widerstand und die elektrische Kapazität der thermischen Kapazität.¹ Einzelne Gebäudeelemente werden im thermischen Netzwerk in Form thermischer Widerstände repräsentiert. Die über thermische Leiter zusammengesetzten (Temperatur-)Knoten bilden ein Netzwerk, dessen zeitlich veränderlichen Leistungsflüsse berechnet werden können. Damit kann das thermische Verhalten des gesamten Netzwerks beschrieben werden. Während sich das Ohmsche Gesetz auf das Fouriersche Gesetz übertragen lässt, kann über die Kirchhoffsche Knotenregel die thermische Energiebilanz eines Teilsystem aufgestellt werden.²

Die nachfolgenden Ausführungen beschreiben das vereinfachte dynamische Stundenverfahren auf Basis eines Ein-Zonen-Modells – und nicht eines Mehr-Zonen-Modells mit Wärmekopplung zwischen den Zonen.³ Mit Durchführung von Mehrzonenberechnungen steigt die Komplexität und der Berechnungsaufwand, da die Eigenschaften einzelner Zonen separat erfasst werden müssen.

¹ Vgl. Wesselak et al. (2017), S. 304.

² Vgl. Hannoschöck (2018), S. 346.

³ Gebäude sind durch verschiedene Nutzungen, technische Ausrüstungen sowie Geräteausstattungen und damit durch unterschiedliche Innenraumtemperaturen geprägt. Gebäudeteile mit gleichen Innenraumtemperaturen und Nutzungen werden daher im Rahmen der Mehrzonenberechnung über die Festlegung der Systemgrenzen in Form von Zonen voneinander abgegrenzt. Ein-Zonen-Modelle unterscheiden nicht zwischen verschiedenen Räumen unterschiedlicher Nutzung und Konditionierung. Energieflüsse zwischen diesen Räumen werden nicht berücksichtigt. Im Rahmen der DIN EN ISO 13790:2008-09 kann die Einteilung der Zonen nach Wärmezonen erfolgen, die entsprechenden Kriterien sind Abschnitt 6.3.2.1 der Norm zu entnehmen. Beim Ein-Zonen-Modell besteht die Systemgrenze des Gebäudes aus allen Bauteilen, die das konditionierte Gebäudeinnere entweder von der Außenumgebung, von angrenzenden Gebäuden oder von nicht konditionierten Gebäudeteilen trennt (Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 26).

In Abstimmung mit den zur Verfügung stehenden Gebäudedaten des Projekts ENOB:dataNWG wird für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen ein Ein-Zonen-Modell herangezogen. Die Mehrzonenberechnung ist den Anhängen der DIN EN ISO 13790:2008-09 zu entnehmen. Die nachfolgenden Ausführungen und Ergänzungen zielen darauf ab, ein Verständnis für die später aufgeführten programmtechnischen Umsetzungen und Änderungen zu schaffen. Es wird ein Überblick über die relevanten Verfahrensschritte vermittelt, wie sie für die Simulationen durchgeführt werden. Sonderfälle und Einzelheiten sind den entsprechenden Abschnitten der Norm zu entnehmen.

Das vereinfachte Stundenverfahren der DIN EN ISO 13790:2008-09 beschreibt das thermische Verhalten eines Gebäudes mithilfe eines thermischen Ersatzschaltbildes, das aus fünf Widerständen und einer Kapazität besteht. Das 5R1C-Modell berücksichtigt sowohl die Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Bauteile als auch die Wärmespeicherkapazität des Gebäudes. Um den Wärmeaustausch zwischen dem Gebäudeinnern und der Außenumgebung zu berücksichtigen, verwendet das Modell fünf Wärmewiderstände. Diese sind mit drei internen Knoten, die die mittlere Temperatur der innen liegenden Gebäudeoberflächen Θ_s , die Temperatur der thermischen Masse Θ_m und die Innenlufttemperatur Θ_{air} darstellen, sowie zwei äußeren Temperaturknoten, der Außenlufttemperatur Θ_e und der Zulufttemperatur Θ_{sup} , gekoppelt. Zur Vereinfachung und zur Reduzierung des Rechenaufwands werden die thermischen Speichereffekte infolge von Wärmeabsorption und -freisetzung über die Wärmekapazität des Gebäudes in einem Kondensator zusammengefasst. Jeder Knotenpunkt des Netzwerkes ist über einen Wärmewiderstand mit einem benachbarten Temperaturknoten verbunden. Zur Berechnung der stündlichen Menge an Nutzenergie für Raumwärme- und/oder -kühlung wird die Menge an Heiz- und/oder Kühlleistung berechnet, die dem Knoten Θ_{air} hinzu- oder abgeführt werden muss, um einen Mindest- oder Höchstwert der Solltemperatur aufrechtzuerhalten.⁴ Abb. 1.1 stellt den Aufbau des 5RC1-Netzwerkes als thermisches Ersatzschaltbild dar.

Die Hauptvariablen des Modells sind die Wärmetransferkoeffizienten für Transmission, untergliedert in einen fensterbezogenen Teil $H_{tr,w}$ ⁵ für den Wärmedurchgang zwischen der Außenluft und dem inneren Oberflächenknoten durch Fenster und einen Teil für die opaken Bauteile des Gebäudes $H_{tr,op}$. Die Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innentemperatur verursacht einen Wärmestrom über die Gebäudehülle, der u. a. durch stoffliche und konstruktionsbedingte Faktoren beeinflusst wird. Für die Berechnung des Transmissionswärmetransferkoeffizienten wird daher zwischen einem Anteil für Fensterflächen und opake Bauteilflächen unterschieden. Der Wärmetransferkoeffizient $H_{tr,op}$ repräsentiert in seiner Gesamtheit die Kopplung zur thermisch wirksamen Masse. Er ist unterteilt in einen Leitwertterm $H_{tr,em}$, der die thermisch wirksame Speichermasse des Gebäudes konzentriert und den Wärmetransport zwischen der Außenluft und dem inneren Masseknoten Θ_m durch die Außenwand abbildet und in einen zweiten Term $H_{tr,ms}$, der die Wärmeleitung zwischen dem Knoten der Gebäudemasse Θ_m und dem Oberflächenknoten

⁴ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 34.

⁵ Für $H_{tr,w}$ wird eine thermische Masse von null angenommen (Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 34).



Die Bestimmung der Transmissionswärmetransferkoeffizienten für Fenster $H_{tr,w}$ und opake Bauteile $H_{tr,op}$ werden ausgehend von den entsprechenden materialspezifischen Werten und den Bauteilflächen berechnet. Da aus dem Projekt ENOB:dataNWG keine Informationen über die am Gebäude auftretenden Wärmebrücken bekannt sind, vereinfacht sich Gl. (18) der DIN EN ISO 13790:2008-09 zu:⁸

Der Gesamt-Transmissionswärmetransferkoeffizient $H_{tr,adj}$ ergibt sich aus der Summe der

⁸ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 43 f.

Mit:

- H_x : Transmissionswärmetransferkoeffizient für Fenster resp. opake Bauteile
- $b_{tr,x}$: Temperaturanpassungsfaktor für nicht an die Außenluft angrenzende Bauteile
- A_i : Hüllfläche des Bauteils i [in m²]
- U_i : Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils i der Gebäudehülle [in W/(m²K)]

einzelnen Transmissionswärmetransferkoeffizienten.⁹

Der Kopplungsleitwert zwischen den Knoten Θ_m und Θ_s ist beschrieben durch:¹⁰

$$H_{tr,ms} = h_{ms} \cdot A_m \quad (1.2)$$

Der spezifische Wärmetransferkoeffizient h_{ms} ist mit einem Wert von 9,1 W/(m²K) festgesetzt. A_m lässt sich gem. Tab. B.1 (in Anhang B dieser Arbeit) in Abhängigkeit der konditionierten Nutzungsfläche¹¹ A_f abschätzen. $H_{tr,em}$ ist beschrieben durch:¹²

$$H_{tr,em} = \frac{1}{\frac{1}{H_{tr,op}} - \frac{1}{H_{tr,ms}}} \quad (1.3)$$

Der thermische Kopplungsleitwert $H_{tr,is}$ zur Kopplung des Lufttemperaturknotens und dem Oberflächenknoten ergibt sich aus Gleichung (1.4):¹³

$$H_{tr,is} = h_{is} \cdot A_{tot} \quad (1.4)$$

Dabei ist der Wärmetransferkoeffizient h_{is} auf einen Wert von 3,45 W/(m²K) festgelegt und der Oberflächeninhalt aller zur Gebäudezone weisenden Flächen A_{tot} wird mit $A_{tot} = 4,5A_f$ abgeschätzt.¹⁴

Der Lüftungswärmetransferkoeffizient H_{ve} wird nach Gleichung (1.5) für jedes Luftvolumenstromelement k , das über die Gebäudehülle ein- bzw. austritt, berechnet. Berücksichtigt werden können bspw. Luftvolumenströme durch freie Lüftung über Fenster, Infiltration, Belüftungen durch raumlufttechnische Anlagen (RLT-Anlagen) oder Nachtlüftungen.¹⁵

$$H_{ve,adj} = p_a \cdot c_a \sum_k b_{ve,k} \cdot q_{ve,k,mn} \quad (1.5)$$

Im Anschluss an die Berechnung der zeitlich konstanten Größen $H_{tr,adj}$, $H_{tr,ms}$, $H_{tr,is}$ und C_m beginnt das stündliche Berechnungsverfahren mit der Bestimmung der internen und solaren

⁹ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 44.

¹⁰ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 79.

¹¹ Die konditionierte Nutzungsfläche umfasst die beheizten und/oder gekühlten Anteile sämtlicher „[...] Grundflächen der nutzbaren Räume aller Grundrissebenen des Bauwerks [...]“, die für den wesentlichen Zweck des Gebäudes bestimmt sind (DIN 277-1:2016-01, S. 4 i. V. m. Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 12, 30). Da mit Änderung der DIN 277 im Jahr 2016 der Begriff Nutzfläche in Nutzungsfläche umbenannt wurde, wird in dieser Arbeit von Nutzungsfläche gesprochen (Vgl. DIN 277-1:2016-01, S. 3).

¹² Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 79.

¹³ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 35.

¹⁴ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 35 f.

¹⁵ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 49 f.

Mit:

$p_a c_a$: Auf das Volumen bezogene Wärmespeicherfähigkeit der Luft
 $[p_a c_a = 1200 \text{ J}/(\text{m}^3\text{K})]$

$b_{\text{ve},k}$: Temperaturanpassungsfaktor für Luftvolumenstromelement k .
 $b_{\text{ve},k} \neq 1$, wenn $\Theta_{\text{sup},k} \neq \Theta_e$ (z. B. bei einer Wärmerückgewinnungseinheit der RLT-Anlage)

$q_{\text{ve},k,\text{mn}}$: zeitl. gemittelter Luftvolumenstrom des Volumenstromelements k [in m^3/s]

Wärmegewinne. Φ_{sol} stellt den Wärmestrom durch solare Einträge in Folge direkter und diffuser Solareinstrahlung auf die Außenflächen der Gebäudehülle dar. Die solaren Wärmeeinträge sind abhängig von Klimadaten (insbesondere Außentemperatur) und lagebezogenen Größen wie Sonnenstand, Sonneneinstrahlung und Verschattung sowie gebäudespezifischen Größen wie bspw. der Ausrichtung des Gebäudes und dem Energiedurchlassgrad der Bauteile.¹⁶ Im Rahmen dieser Arbeit werden solare Wärmeeinträge über die verglasten Bauteilflächen berücksichtigt, Kollektorflächen opaker Bauteile werden aufgrund ihres tendenziell geringen Anteils an den gesamten solaren Wärmegewinnen vernachlässigt.¹⁷ Für die programmtechnische Umsetzung der Norm werden Vereinfachungen bei der Bestimmung des Wärmestroms Φ_{sol} vorgenommen. Die Wärmestrahlung an den Himmel sowie Verschattungen durch Umgebungsbebauungen oder sonstige Hindernisse werden mangels Informationen nicht berücksichtigt. Die Berechnung der solaren Gewinne erfolgt in Kapitel 2.1 und 2.2.3). Der Wärmestrom Φ_{int} umfasst die Gesamtheit der Wärmeeinträge aus inneren Wärmequellen innerhalb des konditionierten Gebäudes, die nicht über die Heizungstechnik oder Warmwasseraufbereitung erzeugt werden. Für die inneren Wärmeeinträge werden folgende Quellen berücksichtigt:

- Abwärme der Gebäudenutzer durch Stoffwechselvorgänge
- Verlustwärme der technischen Geräteausstattung
- Verlustwärme infolge der elektrischen Beleuchtung

Wärmeaustausch über Warm-, Kalt- und Abwassersysteme sowie Prozesswärme oder rückgewinnbare thermische Verluste durch Heiz-, Kühl- und RLT-Anlagen können potenziell zur Veränderung der inneren Gewinne beitragen, werden jedoch aufgrund mangelnder Eingangsdaten im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt.¹⁸ Die programmtechnische Umsetzung zur Berechnung der inneren Wärmeeinträge ist in Kapitel 2.1 und 2.2.2 erläutert.

Die stündlichen Wärmeströme aus internen und solaren Wärmequellen werden auf die drei Temperaturknoten aufgeteilt und nach Gl. (1.6) - (1.8) berechnet. Für den Zusammenhang der Wärmeströme gilt dabei:¹⁹ $\Phi_{\text{int}} + \Phi_{\text{sol}} = \Phi_{\text{ia}} + \Phi_{\text{st}} + \Phi_m$

$$\Phi_{\text{ia}} = \frac{1}{2} \Phi_{\text{int}} \quad (1.6)$$

¹⁶ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 65, 67.

¹⁷ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 68.

¹⁸ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 58.

¹⁹ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 109.

$$\Phi_m = \frac{A_m}{A_t} \left(\frac{1}{2} \Phi_{\text{int}} + \Phi_{\text{sol}} \right) \quad (1.7)$$

$$\Phi_{\text{st}} = \left(1 - \frac{A_m}{A_t} - \frac{H_{\text{tr,w}}}{9,1 \cdot A_t} \right) \left(\frac{1}{2} \Phi_{\text{int}} + \Phi_{\text{sol}} \right) \quad (1.8)$$

Die Hälfte der inneren Gewinne wird als konvektiv betrachtet und direkt dem Knoten der Innentemperatur zugeführt. Die andere Hälfte der internen Gewinne wird zusammen mit den solaren Gewinnen Φ_{sol} als Wärmestrahlung behandelt und zwischen dem Oberflächen- und Masseknoten aufgeteilt.²⁰

Unter Bezugnahme auf Abbildung 1.1 sind zu einer gegebenen Stunde alle Werte mit Ausnahme von $\Phi_{\text{HC,nd}}$ bekannt. $\Phi_{\text{HC,nd}}$ stellt die von der Heiz-/Kühlanlage zur Aufrechterhaltung einer bestimmten Raum-Solltemperatur bereitgestellte thermische Last dar. Für jede Stunde werden die Temperaturen der Knoten Θ_m , Θ_s und Θ_{air} bestimmt. Somit wird anschließend der Heiz- oder Kühlbedarf ermittelt der ggf. notwendig ist, um eine erforderliche Raumsolltemperatur aufrechtzuerhalten. Indem die in der thermischen Masse gespeicherte Wärmeenergie zum Zeitpunkt $t-1$ berücksichtigt wird, kann die Heiz- bzw. Kühllast unter Berücksichtigung der Außentemperatur zum Zeitpunkt t bestimmt werden. Das hierfür verwendete numerische Lösungsmodell basiert auf dem Crank-Nicolson Verfahren. Der Initialwert für $\Theta_{m,t}$ wird dabei vom Anwender festgelegt. Die Temperatur der Gebäudemasse $\Theta_{m,t}$ wird ausgehend vom Wert $\Theta_{m,t-1}$ wie folgt berechnet:²¹

$$\Theta_{m,t} = \frac{\Theta_{m,t-1} \left[\frac{C_m}{3600} - 0,5(H_{\text{tr,3}} + H_{\text{tr,em}}) \right] + \Phi_{\text{mtot}}}{\frac{C_m}{3600} + 0,5(H_{\text{tr,3}} + H_{\text{tr,em}})} \quad (1.9)$$

mit:²²

$$\Phi_{\text{mtot}} = \Phi_m + H_{\text{tr,em}} \Theta_e + \frac{H_{\text{tr,3}}}{H_{\text{tr,2}}} [\Phi_{\text{st}} + H_{\text{tr,w}} \Theta_e + H_{\text{tr,1}} \Theta_{\text{sup}} + \frac{H_{\text{tr,1}}}{H_{\text{ve}}} (\Phi_{\text{ia}} + \Phi_{\text{HC,nd}})] \quad (1.10)$$

wobei:²³

$$H_{\text{tr,1}} = \frac{1}{\frac{1}{H_{\text{ve}}} + \frac{1}{H_{\text{tr,is}}}} \quad (1.11)$$

$$H_{\text{tr,2}} = H_{\text{tr,1}} + H_{\text{tr,w}} \quad (1.12)$$

$$H_{\text{tr,3}} = \frac{1}{\frac{1}{H_{\text{tr,2}}} + \frac{1}{H_{\text{tr,ms}}}} \quad (1.13)$$

²⁰ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 109 f.

²¹ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 110.

²² Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 110.

²³ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 110.

Die stündlichen Mittelwerte der Temperaturknoten ergeben sich wie folgt:²⁴

$$\Theta_m = \frac{1}{2}(\Theta_{m,t} + \Theta_{m,t-1}) \quad (1.14)$$

$$\Theta_s = \frac{H_{tr,ms}\Theta_m + \Phi_{st} + H_{tr,w}\Theta_e + H_{tr,1}(\Theta_{sup} + \frac{\Phi_{ia} + \Phi_{HC,nd}}{H_{ve}})}{H_{tr,ms} + H_{tr,w} + H_{tr,1}} \quad (1.15)$$

$$\Theta_{air} = \frac{H_{tr,is}\Theta_s + H_{ve}\Theta_{sup} + \Phi_{ia} + \Phi_{HC,nd}}{H_{tr,is} + H_{ve}} \quad (1.16)$$

Dabei ist zu beachten, dass die Innentemperatur Θ_{air} als lineare Funktion von $\Phi_{HC,nd}$ ausgedrückt wird, was die Berechnung von $\Phi_{HC,nd}$ für unterschiedliche Werte erlaubt.²⁵

Zur Berechnung der Innentemperatur und des tatsächlichen Heizwärme- bzw. Kühlbedarfs wird in einem ersten Schritt die aktuelle Innentemperatur unter der Annahme $\Phi_{HC,nd} = 0$ berechnet, das heißt diejenige mittlere Raumtemperatur, die sich zur gegebenen Stunde ohne Heizung/Kühlung einstellt. Sofern die resultierende Raumtemperatur zwischen dem Sollwert der Heizung und der Kühlung liegt, ist in der entsprechenden Stunde weder Heiz- noch Kühlleistung erforderlich und der nächste Zeitschritt beginnt. Trifft dies nicht zu, wird in einem nächsten Schritt der Sollwert ausgewählt, für den der entsprechende Heizwärme- bzw. Kühlbedarf berechnet wird. Sofern $\Theta_{air} > \Theta_{set,C}$, gilt $\Theta_{air,set} = \Theta_{set,C}$. Für $\Theta_{air} < \Theta_{set,H}$ gilt $\Theta_{air,set} = \Theta_{set,H}$. Bei diesem Verfahrensschritt wird für die Berechnung des Bedarfs $\Phi_{HC,nd} = 10 \cdot A_f$ angesetzt, womit im Ergebnis die Lufttemperatur bei einer Heizleistung von 10 W/m^2 resultiert.²⁶

Über:

$$\Phi_{HC,nd,un} = \frac{\Phi_{HC,nd,10}(\Theta_{air,set} - \Theta_{air,0})}{\Theta_{air,10} - \Theta_{air,0}} \quad (1.17)$$

wird die Heizwärme- bzw. Kühlleistung berechnet, die notwendig ist, um die gesetzte Solltemperatur zu erreichen. In einem nächsten Schritt wird geprüft, ob die maximal verfügbare Kühl- resp. Heizleistung ausreicht, um den uneingeschränkten Heizwärme- bzw. Kühlbedarf zu decken. Ist dies der Fall, ist die Berechnung für den Stundenschritt abgeschlossen, andernfalls ist die Innentemperatur unter Berücksichtigung der maximal verfügbaren Kühl- resp. Heizleistung zu berechnen. Für jeden der drei bzw. vier Verfahrensschritten werden die Gleichungen (1.9) - (1.16) durchlaufen.²⁷ Die Sollwerttemperaturen werden dabei als konstante Parameter in den Ablauf aufgenommen. Diese können auch zeitlich variabel sein, aufgrund mangelnder Informationen werden diese bei der programmtechnischen Umsetzung der Norm als konstant betrachtet.²⁸ Abb. B.1 in Anhang B dieser Arbeit fasst den Ablauf der stündlichen Berechnung zusammen.

²⁴ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 110 f.

²⁵ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 111.

²⁶ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 112 f.

²⁷ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 110-113.

²⁸ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 89.

Kapitel 2

Modellimplementierung zur Simulation eines Gebäudebestands

2.1 Umsetzung im RC_BuildingSimulator

Der in Python3 geschriebene RC_BuildingSimulator ist für die Berechnung des Raumwärme- und -kältebedarfs eines Gebäudes in Form eines Ein-Zonen-Modells konzipiert. Im Rahmen dieser Arbeit werden diverse Veränderungen am Programmcode vorgenommen, sodass das später verwendete Simulationswerkzeug nicht mehr seinem Urzustand entspricht. Um die einzelnen Arbeitsschritte und den Weg der Ergebnisfindung möglichst transparent zu gestalten, wird im folgenden Abschnitt zunächst der ursprüngliche Aufbau des Simulationstools in seinen Grundzügen erläutert. Die auf dieser Grundlage vorgenommenen Veränderungen werden im nachfolgenden Kapitel 2.2 beschrieben.

Ein allgemeines Informationsflussschema einer Gebäudesimulation lässt sich vereinfacht nach Abb. 2.1 darstellen. Diesem Schema aus Klimadaten sowie zeitabhängigen und zeitunabhängigen Parametern, die in Wechselbeziehung zum thermischen Gebäudemodell stehen, folgt auch der Programmablauf des RC_BuildingSimulators. Das Kernstück der Simulation, das thermische Modell des Gebäudes, basiert dabei auf dem in Kapitel 1.1 vorgestellten 5R1C-Netzwerk gem. DIN EN ISO 13790:2008-09.

Zeitunabhängige Parameter sind Eingangsgrößen, die im Verlauf der Simulation konstant gehalten werden und daher nicht auf stündlicher Basis ermittelt werden (Vgl. 1.1). Hierzu zählen:

- Geometrische Daten des Gebäudes wie Außenwand- und Fensterflächen, die konditionierte Nutzungsfläche und das Volumen des Gebäudes oder der Oberflächeninhalt der Gebäudeinnenseite
- Bauphysikalische Parameter der opaken Bauteile wie der Wärmedurchgangskoeffizient der Außenwände oder die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes
- Bauphysikalische Parameter der transparenten Bauteile bspw. der Wärmedurchgangskoeffizient der Fenster oder der Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung
- Angaben zur künstlichen Beleuchtung wie der spezifische Beleuchtungsbedarf oder die Mindestbeleuchtungsstärke

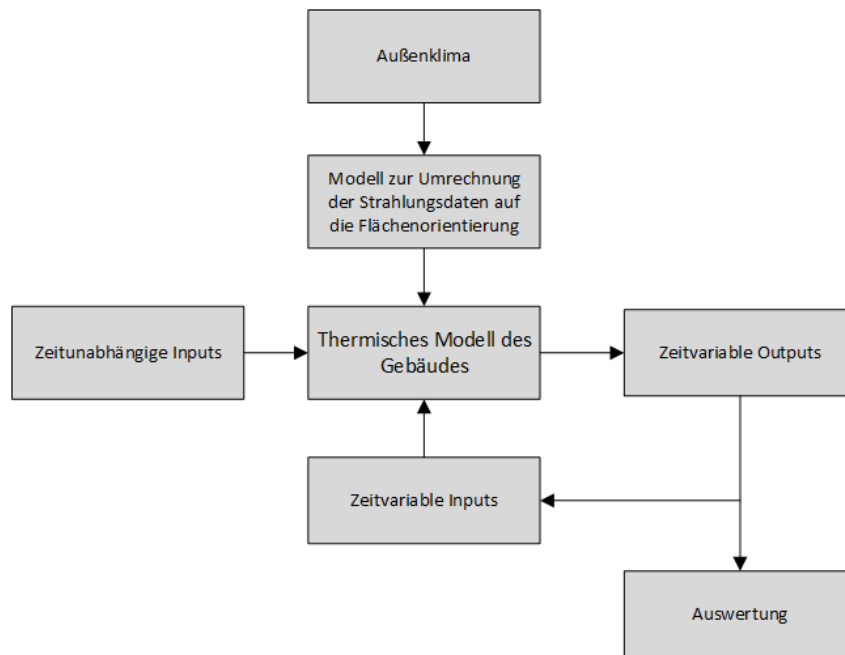


Abbildung 2.1: Allgemeiner Ablauf einer Gebäudesimulation [Eigene Darstellung in Anlehnung an Leimer (2016), S. 46]

- Angaben zur Raumluft wie Luftwechselraten durch Ventilation und Infiltration oder, falls vorhanden, die Effizienz der Wärmerückgewinnungseinheit der RLT-Anlage
- Angaben zur Wärme- und Kühlanlage sowie die Art der Wärme- resp. Kälteübergabe im Gebäude
- Angaben zur Solltemperatur der Heizung und Kühlung
- Angaben zur maximalen Heizlast/Kühllast

Informationen zum Außenklima werden im Programm über einen externen Datensatz bereitgestellt, wobei die meteorologischen Daten als Stundenwerte vorliegen müssen. Für die Simulation werden die Klimakomponenten Außenlufttemperatur, Solarstrahlung (Direktnormalstrahlung¹ und horizontale Diffusstrahlung²) und die Beleuchtungsstärke (direkte Beleuchtungsstärke (normal)³ und diffuse Beleuchtungsstärke (horizontal)⁴) benötigt. Diese Informationen werden in Form eines gebündelten Datensatzes im EnergyPlus Weather (EPW)-Dateiformat⁵ eingebunden. Da der RC_BuildingSimulator für die Simulation eines einzelnen Gebäudes und nicht

¹ Menge der Solarstrahlung in Wh/m², die in einer Stunde direkt auf eine senkrecht zur Sonnenrichtung stehende Ebene eingestrahlt wird (Vgl. DOE (2020), S. 65).

² Menge der vom gesamten Himmelshalbraum (exklusive der solaren Direktstrahlung) in einer Stunde emittierten Strahlung (in Wh/m²) auf eine horizontale Ebene (Vgl. DOE (2020), S. 65).

³ Durchschnittliche Beleuchtungsstärke in Lux, die durch den sichtbaren Teil der direkten Sonneneinstrahlung auf eine senkrecht zur Sonneneinstrahlung stehenden Ebene erzeugt wird (Vgl. DOE (2020), S. 65).

⁴ Durchschnittliche Beleuchtungsstärke in Lux, die durch den sichtbaren Teil der diffusen Sonnenstrahlung auf einer horizontalen Ebene erzeugt wird (Vgl. DOE (2020), S. 65 f.)

⁵ Aufbereitete Wetterdaten für weltweit verteilte Standorte im EnergyPlus Weather Format, die für gewöhnlich in der Gebäudesimulationssoftware EnergyPlus verwendet werden.

für die Simulation eines Bestands konstruiert ist, wird im Programmcode die Verknüpfung zwischen örtlichem Klimadatensatz und Gebäude manuell vorgenommen.⁶ Zur Berechnung der solaren Gewinne werden zunächst die am Gebäude vorhandenen Fenster in Abhängigkeit des Energiedurchlassgrads, des Lichttransmissionsgrads sowie der jeweiligen Fensterfläche nach Himmelsrichtungen definiert. Unabhängig von den meteorologischen Daten wird der Sonnenstand aus Längen- und Breitengrad des entsprechenden Standortes, Datum und Uhrzeit berechnet und durch Azimutwinkel (Sonnenazimut) und Elevationswinkel (Sonnenhöhe) beschrieben. Die Bestimmung des Sonnenstands folgt der Methodik von Quaschnig und Hanitsch (1995). Nach Berechnung des Anteils der direkten und diffusen Solarstrahlung auf die geneigte Fensterfläche werden die solaren Gewinne zu einer bestimmten Stunde t wie folgt ermittelt:

$$SG(t) = \sum_{n=0}^N (R_N(t) + R_H(t)) \cdot A_{F,n} \cdot g_V \quad (2.1)$$

Mit:

- R_N : Anteil der Direktstrahlung zur Stunde t [in Wh/m²]
- R_H : Anteil der Diffusstrahlung zur Stunde t [in Wh/m²]
- $A_{F,n}$: Fensterfläche je Himmelsrichtung $n = \{0,1,2,3\}$ [in m²]
- g_V : Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung

Der auf die Fensterflächen treffende Lichtstrom wird wie folgt berechnet:⁷

$$B(t) = \sum_{n=0}^N (I_N(t) + I_H(t)) \cdot A_{F,n} \quad (2.2)$$

Mit:

- I_N : Anteil der direkten Beleuchtungsstärke zur Stunde t [in lx]
- I_H : Anteil der diffusen Beleuchtungsstärke zur Stunde t [in lx]
- $A_{F,n}$: Fensterfläche je Himmelsrichtung $n = \{0,1,2,3\}$ [in m²]

Die Methodik zur Bestimmung der mittleren Beleuchtungsstärke infolge des Tageslichts folgt der Total-Flux-Methode:⁸

$$\varphi(t) = \frac{B(t) \cdot M \cdot UF \cdot \tau_V}{A_f} \quad (2.3)$$

Sofern die mittlere Beleuchtungsstärke aus Gl. (2.3) geringer als die erforderliche Mindestbeleuchtungsstärke ist und sich zur gegebenen Stunde Personen im Gebäude befinden, berechnet

⁶ Für die vorliegende Arbeit wird eine Vielzahl von Gebäuden an unterschiedlichen Standorten simuliert. Die händische Verknüpfung scheint dabei hinderlich zu sein, sodass dieser Schritt für die durchgeführten Simulationen automatisiert wird (Vgl. Kap. 2.2.2).

⁷ Vgl. Szokolay (1980), S. 104.

⁸ Vgl. Szokolay (1980), S. 103-105.

Die gleiche Vorgehensweise wird ebenso in jüngerer Literatur vorgestellt (Vgl. Szokolay (2008), S. 154).

Mit:

- M : Wartungsfaktor der Fensterflächen
 UF : Lichtausnutzungsgrad
 τ_V : Lichttransmissionsgrad der Verglasung
 A_f : konditionierte Nutzungsfläche [in m²]

sich der stündliche elektrische Beleuchtungsbedarf zu:

$$\text{Elektr. Beleuchtungsbedarf} = \text{spez. Beleuchtungsbedarf} \cdot \text{beleuchtete Fläche} \quad (2.4)$$

Neben Klimadaten müssen noch weitere zeitabhängige Parameter vorgegeben werden. Hierbei handelt es sich in erster Linie um Personenbelegungspläne, die das Verhalten und die Anwesenheit der Gebäudenutzer abbilden und insbesondere für die Berechnung der internen Wärmegewinne maßgebend sind. Mit ihrem Aufenthalt und ihren Aktivitäten im Gebäude erzeugen die Gebäudenutzer durch Stoffwechselvorgänge im Körper sowohl einen Abwärmestrom als auch einen Bedarf an elektrischer Leistung für Beleuchtung und technische Geräte.⁹ Diese durch den Nutzer verursachten Vorgänge können mithilfe von standardisierten Tages- und Wochengängen berücksichtigt werden. Im Rahmen des RC_BuildingSimulator erfolgt die Abbildung der Personenbelegung in Form einer solchen deterministischen Modellierung. Ein Personenbelegungsprofil gibt die stündlichen Wahrscheinlichkeiten über die Anwesenheit von Gebäudenutzern an Wochentagen, Samstagen und Sonntagen für unterschiedliche Typen der Gebäudenutzung an.¹⁰ Im RC_BuildingSimulator ist standardmäßig das Personenprofil für Büroräume der SIA2024:2015 hinterlegt. Mithilfe dieser Informationen erfolgt die Berechnung der internen Gewinne durch die Gebäudenutzer und der technischen Geräteausstattung auf stündlicher Basis nach:

$$IG(t) = N_{\text{Personen}}(t) \cdot W_{\text{Person}} + W_{\text{Geräte}} \cdot A_f \quad (2.5)$$

$$\text{Wobei: } N_{\text{Personen}}(t) = P_{\text{occ}}(t) \cdot N_{\text{max}}$$

Mit:

- $N_{\text{Personen}}(t)$: Anzahl der Personen im Gebäude
 W_{Person} : Wärmegewinn pro Person [in W]
 $W_{\text{Geräte}}$: Wärmegewinn der technischen Geräte [in W]
 A_f : konditionierte Nutzungsfläche [in m²]
 $P_{\text{occ}}(t)$: Wahrscheinlichkeit über die Anwesenheit von Gebäudenutzern
 N_{max} : Maximale Personenanzahl im Gebäude

Angaben zur maximalen Personenanzahl im Gebäude, Wärmegewinne je Person und Wärmegewinne durch technische Geräte werden dabei zu Beginn der Simulation manuell im Programmcode festgelegt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass nach Gl. (2.5) Wärmegewinne durch Personen nur zu den internen Wärmegewinnen hinzugerechnet werden, wenn sich Personen im

⁹ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 58.

¹⁰ Vgl. SIA 2024:2015.

Gebäude befinden; Wärmegewinne durch die technische Geräteausstattung werden auch bei Abwesenheit der Gebäudenutzer berücksichtigt.¹¹

Die programmtechnische Umsetzung der jährlichen Simulation geschieht im RC_BuildingSimulator über das Python-Modul *annualSimulation.py*. Dort werden zunächst die gebäudespezifischen Parameter initialisiert (Vgl. Tab. A.1 in Anhang A dieser Arbeit) und ein Personenbelegungsprofil verknüpft. Der Wärmegewinn pro Person, die Wärmegewinne in Folge der technischen Geräteausstattung, die maximale Personenbelegung sowie die Ausgangstemperatur, mit der die Simulation beginnen soll, werden definiert. Während eine Schleife über die 8760 Stunden¹² eines Jahres iteriert, werden bei jedem Durchgang weitere Module wie bspw. *building_physics.py* (setzt die DIN EN ISO 13790:2008-09 zur Berechnung der stündlichen Raumwärme- und -kältebedarfe um) und *radiation.py* (dient der Berechnung der sonnenstandsabhängigen Größen wie der solaren Gewinne und der Beleuchtungsstärke) aufgerufen. Die stündlichen Ergebnisse werden anschließend in einem DataFrame gespeichert. In Tab. A.1 in Anhang A dieser Arbeit werden alle Übergabeparameter, die für die Initialisierung eines Gebäudes notwendig sind, zusammengefasst.

2.2 Adaption der Simulationsumgebung

Im Folgenden wird die ursprüngliche Ausgestaltung des RC_BuildingSimulators an die Bedürfnisse hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Eingangsdaten angepasst und dessen Funktionsumfang erweitert. Damit einhergehend werden etwaige Schwachstellen verbessert und die Berechnungsergebnisse präzisiert. Die grundlegenden Anpassungen an der Programmstruktur werden erläutert und ein adaptiertes Simulationswerkzeug vorgestellt wie es für die Simulationen verwendet wird. Um Simulationen auf Basis von zwei verschiedenen Gebäudedatensätzen (Tiefen-/Breitenerhebung) durchzuführen, die sich in ihrem Detaillierungsgrad und ihrer Struktur voneinander unterscheiden, wird dem Dynamic ISO Building Simulator (DIBS) ein Datenverarbeitungsprozess vorangestellt. Wie und in welcher Form die Eingangsdaten der zwei Gebäudedatensätze mit zusätzlichen Informationen aufbereitet werden, wird in Kapitel 3.1 und 4.1 erläutert.

2.2.1 Anpassungen zur Simulation eines Gebäudebestands und Ergänzung der Eingangsparameter

Im RC_BuildingSimulator wird für die Berechnung des Raumwärme- und -kältebedarfs zunächst ein Objekt der Klasse *Building()* mit den ihm zugewiesenen Werten für die in Tab. A.1 im Anhang aufgeführten Attribute bzw. Eingangsparameter erzeugt. Die Initialisierung erfolgt dabei über manuelle Eingabe der Eingangsparameter im Programmcode. Für die Simulation über einen

¹¹ In Kapitel 2.2.2 wird dieser Umstand korrigiert und die internen Wärmegewinne durch technische Geräte an die Nutzungszeiten des Gebäudes angepasst.

¹² Die Berechnung erfolgt für ein Nicht-Schaltjahr. Die in Kapitel 2.2 vorgestellten Klimadaten sowie Personen- und Geräteprofile liegen für Nicht-Schaltjahre vor.

Gebäudebestand scheint die händische Wertzuweisung ungeeignet. Daher ist der Ablauf im DIBS automatisiert und läuft wie folgt ab:

1. Einlesen des aufbereiteten Eingangsdatensatz mit allen notwendigen Informationen über den zu simulierenden Gebäudebestand
2. Initialisierung eines Objekts der Klasse *Building()* aus erster Zeile des Datensatzes
3. Berechnung der stündlichen Raumwärme- und Kältebedarfe für das entsprechende Gebäude sowie anschließende Ergebnissicherung der aufsummierten Jahreswerte

Im Rahmen der Ergebnissicherung von Punkt 3 wird ein zusammengefasster Datensatz erzeugt, der Auskunft über das Gebäude mit seinen jährlichen Bedarfen gibt. Ausgewiesen werden neben der Gebäude-ID absolute und spezifische Nutzenergie Raumwärme- und -kälte, absolute und spezifische Endenergie Raumwärme- und -kälte, Beleuchtungsbedarf (absolut), Interne Gewinne (absolut), solare Gewinne nach Orientierung (absolut), die Gebäudefunktion (Unterkategorie), das verwendete Nutzungsprofil der SIA2024:2015, das Nutzungsprofil der DIN 18599-10:2018-09 sowie die Bezeichnung der verwendeten Wetterdatei. Nach Abschluss der Bedarfsberechnung eines Gebäudes beginnt direkt die Initialisierung des nächsten Gebäudes aus der nächsten Zeile des eingelesenen Datensatzes (Punkt 1). Der Ablauf folgt Punkt 2 und Punkt 3. Das Programm iteriert über den gesamten Datensatz und damit über alle Gebäude im Portfolio. Nach Durchlauf aller Gebäude wird für jedes Gebäude eine Datei mit den stündlichen Einzelergebnissen gespeichert. Diese Dateien enthalten jeweils die stündlichen Berechnungsergebnisse für die Nutz- und Endenergie für Raumwärme- und -kälte, aktuelle Innen- und Außentemperatur, Beleuchtungsbedarf, interne Gewinne, solare Gewinne nach Orientierung sowie die Tageszeit. Ein zusammengefasster Ablaufplan der Simulation befindet sich in C.3 in Anhang C.

Im Rahmen des Projekts ENOB:dataNWG erhielt jedes Gebäude eine einmalige ID (festgehalten unter der Bezeichnung *scr_gebaeude_id*), die hier verwendet wird, um die obigen Ergebnisse der Bedarfsberechnung archivieren und zu einem späteren Zeitpunkt wieder identifizieren zu können. Für die Ergebnissicherung der Stundenwerte wird der Datensatz eines entsprechenden Gebäudes nach der Konvention *scr_gebaeude_id.xlsx* benannt. Durch die Haupt- und Unterkategorie der Gebäudefunktion (*hk_geb*) und (*uk_geb*) wird jedes Gebäude in seiner Funktion beschrieben. Während *hk_geb* auf den Hauptzweck des Gebäudes, d. h. auf die überwiegende Gebäudefunktion abzielt, weist *uk_geb* spezifizierte Angaben über die jeweilige Gebäudefunktion aus. Diese Angaben sind notwendig um im Rahmen der Berechnung auf Werte standardisierter Nutzungsprofile zurückgreifen zu können, die auf der Gebäudefunktion basieren (Vgl. Kap. 2.2.2). Die vollständige Übersicht der Eingangsparameter im DIBS ist in Anhang A, Tab. A.2 dieser Arbeit dargestellt.

2.2.2 Auflösung örtlicher Beschränkungen und Dynamisierungen

Für die Bedarfsermittlung werden an verschiedenen Stellen Angaben zum örtlichen Außenklima benötigt. Dies betrifft Informationen über die Außenlufttemperatur, die direkte und diffuse

Solarstrahlung sowie die direkte und diffuse Beleuchtungsstärke (Vgl. Kap. 2.1). Für Gebäudesimulationen werden häufig sog. Testreferenzjahre (engl. Test Reference Year (TRY)) herangezogen, wie sie bspw. der Deutsche Wetterdienst (DWD) zur Verfügung stellt.¹³ Der DWD bietet verschiedene Datensätze mit diversen meteorologischen Daten u. a. in stündlicher Auflösung an. Die Testreferenzjahre sollen einen mittleren für das Jahr charakteristischen Witterungsverlauf repräsentieren. Bis 2011 wurde Deutschland in 15 Klimaregionen mit je einer Repräsentanzstation eingeteilt, für die je ein entsprechender Datensatz bereitgestellt wurde. Mit Aktualisierung der Datensätze im Jahr 2017 wurden anstatt der Daten für 15 Klimaregionen individuelle TRY-Datensätze für jeden km² im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland erstellt. Die Datensätze enthalten u. a. Angaben zur Lufttemperatur und zur direkten sowie diffusen Solarstrahlung, jedoch keine Informationen zur Beleuchtungsstärke.¹⁴ Daten zur Beleuchtungsstärke werden in den TRY-Datensätzen seit 2004 nicht mehr ausgewiesen.¹⁵ Da Informationen über die Beleuchtungsstärke essenziell für die Berechnung des elektrischen Beleuchtungsbedarfs im DIBS sind, kann auf diese Informationen nicht verzichtet werden. Deshalb wird im Rahmen dieser Arbeit auf die öffentlich zugänglichen Datensätze von climate.onebuilding.org zurückgegriffen, die diese Informationen bereitstellen.¹⁶ Climate.onebuilding.org weist für Deutschland 455 verschiedene Datensätze für typische meteorologische Jahre (engl. Typical Meteorological Year (TMY)) über den Zeitraum von 1931 - 2019 im standardisierten EnergyPlus Weather (EPW)-Dateiformat aus.¹⁷ TMY-Datensätze im EPW-Format sind inzwischen De-Facto-Standard und werden von mehr als 25 Gebäudesimulationsprogrammen genutzt.¹⁸ Die Erstellung dieser Datensätze orientiert sich an der Methodik der EN ISO 15927-4:2005.¹⁹ Ein typisches meteorologisches Jahr bietet Nutzern ein Datensatz mit stündlichen Messwerten, die die typischen klimatischen Bedingungen an einem bestimmten Standort über ein Zeitraum von min. 10 Jahren widerspiegeln.²⁰ TMY-Daten beinhalten keine Wetterextreme, sondern repräsentieren natürliche tages- und jahreszeitliche Schwankungen. Ein TMY-Datensatz besteht aus 12 typischen meteorologischen Monaten (Januar bis Dezember), die im Wesentlichen unverändert zu einem fortlaufenden Datensatz aus Primärmessungen verknüpft werden und damit ein typisches meteorologisches Jahr bilden. Die 12 typischen Monate werden unter Berücksichtigung verschiedener Klimaparameter (Trockentemperatur der Außenluft, direkte Normalstrahlung, diffuse Sonnenstrahlung auf eine horizontale Fläche, relative oder absolute Luftfeuchte, Dampfdruck oder Taupunkt und Windgeschwindigkeit) anhand statistischer Methoden ausgewählt. Temperatur, Sonnenstrahlung und Luftfeuchte gelten als die wichtigsten Parameter für die Simulation solarer Energiesysteme sowie Gebäudesyste-

¹³ Vgl. Deutscher Wetterdienst (2017), S. 3.

¹⁴ Vgl. Deutscher Wetterdienst (2017), S. 3-5.

¹⁵ Vgl. Christoffer et al. (2004), S. 33

Eine Möglichkeit, die direkte und diffuse Beleuchtungsstärke abzuschätzen, bietet ein von Perez et al. (1990) vorgeschlagenes Verfahren

¹⁶ Climate.onebuilding.org ist eine der von EnergyPlus vorgeschlagen Quellen für Wetterdaten zur Gebäudesimulation. Daher wird für die vorliegende Arbeit angenommen, dass Qualitätsstandards bei der Datengenerierung eingehalten wurden und die Verlässlichkeit der Daten damit gewährleistet ist (Vgl. DOE (o. J.)).

¹⁷ Vgl. Crawley und Lawrie (2019).

¹⁸ Vgl. Crawley und Barnaby (2019), S. 197.

¹⁹ Vgl. Crawley und Lawrie (2019).

²⁰ DIN EN ISO 15927-4:2005, S. 4.

me. Andere Parameter werden bei der Auswahl nicht berücksichtigt, folglich sind ihre Werte auch nicht typisch.²¹ Die Auswahl der Monate für die Zusammenstellung des meteorologischen Jahrs mit stündlichen Werten erfolgt nach einem festen Verfahren „[...] in dem der Mittelwert, deren Häufigkeitsverteilung und die Korrelation zwischen den einzelnen Variablen innerhalb jedes Monates den vieljährigen Werten der entsprechenden Kalendermonate möglichst nahe liegt.“²² Um Sprünge zwischen den Monaten zu vermeiden, werden die letzten und die ersten 8 Stunden des Monats geglättet.²³ Aus dem Datenbestand von *Climate.onebuilding.org* sind alle Datensätze für die Region Deutschland mit einem Beobachtungszeitraum von 2004 - 2019, d. h. 93 Datensätze, in der Simulationsumgebung implementiert. Abb. C.1 in Anhang C dieser Arbeit zeigt die geografische Verteilung der berücksichtigten Wetterstationen. Im DIBS können mithilfe der Funktion *getEPWFile()* in der Simulation *annualSimulation.py* in Abhängigkeit der Postleitzahl des Gebäudes die Daten der nächstgelegenen Wetterstation abgerufen werden. Dies erfolgt unter Hinzunahme eines weiteren Datensatzes, der für jede Postleitzahl die dazugehörigen Längen- und Breitenangaben bereithält.²⁴ Zur Bestimmung der nächstgelegenen Wetterstation werden die Geodaten zwischen den Geodaten des Gebäudestandortes und der Wetterstationen berechnet. Die kürzeste dieser 93 Verbindungskurven bestimmt die nächstgelegene Wetterstation, die nachfolgend Klimadaten für das entsprechende Gebäude liefert.

Ab DIBS Version v.1.1.0 sind zusätzlich zu dem Beobachtungszeitraum von 2004 - 2019 der Beobachtungszeitraum 2007 - 2022 mit 109 Wetterstationen hinterlegt. Da der Einfluss des Klimawandels in den letzten Jahren (Stand 2023) besonders stark sichtbar wurde, stellen diese neueren Daten eine wichtige Ergänzung da. Im Modul *annualSimulation.py* kann nun Beobachtungszeitraum entsprechend gewählt werden. Hierfür muss die Variable *weather_period* entsprechend gesetzt werden. Standardmäßig ist hier noch der Beobachtungszeitraum von 2004 - 2019 gesetzt.

Für die Gebäudesimulation sind nicht nur bauphysikalische Parameter des Gebäudes und Informationen zum Außenklima notwendig, sondern auch Angaben zur Anwesenheit und zum Verhalten der Personen im Gebäude, denn sie bestimmen den Energiebedarf maßgeblich mit. Die Gebäudenutzer nehmen in mehrfacher Hinsicht Einfluss auf das Gebäudeverhalten. Zum einen wirken sie als interne Wärmequelle sowie als CO₂-Produzenten direkt auf das Gebäude ein, zum anderen beeinflussen sie durch ihre Handlungen und Interaktionen wie bspw. über die Steuerung der Beleuchtung, Betriebseinrichtungen, Fensteröffnung und Regelung der Heizung-, Lüftung- und Kältetechnik indirekt das thermische Verhalten des Gebäudes.²⁵ Der folgende Abschnitt konzentriert sich zunächst auf die Abbildung der Nutzeranwesenheiten. Wie in Kapitel 2.1 bereits erwähnt, wird die Anwesenheit von Personen im *RC_BuildingSimulator* und im DIBS mithilfe eines deterministischen Belegungsprofils abgebildet.²⁶ Solche Profile sind bspw. im Normenwerk

²¹ Vgl. Wilcox und Marion (2008), S. 1-2.

²² DIN EN ISO 15927-4:2005, S. 8.

²³ Vgl. DIN EN ISO 15927-4:2005, S. 7.

²⁴ Vgl. Franzen (2019).

²⁵ Vgl. Maderspacher et al. (2012), S. 92.

²⁶ Die Modellierung des Nutzerverhaltens kann zwischen deterministischer und probabilistischer Modellierung unterschieden werden (Vgl. Mahdavi und Tahmasebi (2019), S. 122). Das individuelle Verhalten von

des schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins SIA 2024: *Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik* zu finden.²⁷ Weitere Standardbelegungsprofile sind bspw. in Commercial Reference Building Models of the National Building Stock²⁸, The COMNET Modeling Guidelines & Procedures Manual (MGP)²⁹ und ASHRAE 90.1 enthalten.³⁰ Für die vorliegende Arbeit werden die Belegungsprofile der SIA 2024:2015 herangezogen, da diese den deutschen Gepflogenheiten hinsichtlich des Arbeitsbeginns und -endes, Öffnungs- und Schließzeiten, der Urlaubs- und Ferienzeiten etc. tendenziell eher entsprechen als die Profile des amerikanischen Sprachraums. In der SIA 2024:2015 sind 46 Raumnutzungsprofile enthalten. Für jeden Nutzungstyp sind Personenbelegungen nach Wochentagen, Samstagen und Sonntagen (unter Angabe von Ruhetagen) definiert. Diese geben Auskunft über den Anteil der Personen, die zu einer bestimmten Tageszeit im Gebäude anwesend sind, gemessen am Anteil bei Vollbelegung.³¹ Ferner sind Jahresprofile mit den monatlichen Anteilen der Personen, die im entsprechenden Monat durchschnittlich zur Spitzenzeit anwesend sind, ausgewiesen.³² Das Jahresprofil berücksichtigt über den monatlichen Teillastfaktor die Reduktion der durchschnittlichen Personenanzahl infolge von Feiertagen und Ferien.³³ Der DIBS enthält 24 digitalisierte Belegungsprofile der SIA 2024:2015. Zusätzlich ist das Belegungsprofil für Krankenhäuser aus dem City Energy Analyst (CEA) enthalten. Dieses Profil basiert auf der tatsächlichen Raumnutzung eines Züricher Krankenhauses, zusammengestellt als Kombination der SIA 2024:2015 Nutzungsprofile „Bettenzimmer“ (43 %), „Stationszimmer“ (8,2 %) und „Behandlungsraum“ (56 %).³⁴ Jeder Gebäudefunktion, beschrieben durch die Variablen *hk_geb* und *uk_geb*, ist ein entsprechendes Nutzungsprofil zugeordnet. Die Zuweisungen der Profile zu den entsprechenden Gebäudeklassen sind Tab. C.1 in Anhang C dieser Arbeit zu entnehmen. Die Zuordnungen orientieren sich an den Beschreibungen und Empfehlungen der SIA 2024:2015 und an der vermuteten überwiegenden Gebäudenutzung. Zuweisungen eines einzigen Raumprofils für ein gesamtes Gebäude können nicht die tatsächlichen Gegebenheiten der realen Abläufe im Gebäude widerspiegeln und sind daher immer mit Unsicherheiten verbunden. Zum einen kommen für manche Gebäude aufgrund ihrer unterschiedlichen Nutzung mehrere Profile in Betracht (z. B. für *uk_geb* „Sternehotel“: Profil „Hotelzimmer“ und „Wohnen (Einfamilienhaus/Mehrfamilienhaus)“), zum anderen existiert für andere Gebäude kein korrespondierendes Belegungsprofil (z. B. für *uk_geb* „Gefängnis“ oder *uk_geb* „Schießstand“). Ferner sei an dieser

Personen ist sehr variabel und lässt sich nur begrenzt über standardisierten Belegungsprofile vorhersagen. In jüngerer Zeit wurden Anstrengungen unternommen, stochastische Modelle zu entwickeln, die die Zufälligkeit der Gebäudenutzer erfasst. Mithilfe dieser Modelle wird versucht über Feldbeobachtungen das tatsächliche Verhalten der Nutzer bspw. hinsichtlich ihrer Interaktionen realitätsgetreuer zu erfassen. Je nach Ausgestaltung der Modelle werden verschiedene personenbezogene Informationen wie bspw. Alter oder Geschlecht sowie deren aktuelle Tätigkeit, Aufenthaltsort und/oder Verweildauer im Gebäude einbezogen (Vgl. Maderspacher et al. (2012), S. 92). Stochastische Ansätze zur Nutzeranwesenheit finden in dieser Arbeit keine Berücksichtigung und werden daher auch nicht weiter vertieft. Einen Überblick zu den verschiedenen Ansätzen der stochastischen Modellierung liefert Dong et al. (2018), S. 906- 913.

²⁷ Vgl. SIA 2024:2015.

²⁸ Vgl. Deru et al. (2011).

²⁹ Vgl. COMNET (2010).

³⁰ Vgl. ASHRAE (2016).

³¹ Vgl. SIA 2024:2015, S. 14.

³² Vgl. SIA 2024:2015, S. 14.

³³ Vgl. SIA 2024:2015, S. 6.

³⁴ Vgl. Fonseca et al. (2020).

Stelle darauf hingewiesen, dass auch zwischen den Belegungsprofilen und den Gepflogenheiten in Deutschland Divergenzen auftreten. Bspw. beginnt der Schulunterricht in der Schweiz rund eine Stunde früher als in Deutschland und der Unterricht resp. etwaige Betreuungsangebote finden gem. Belegungsplan wochentags auch am Nachmittag statt. Abb. 2.2 zeigt die stündliche Personenbelegung (zwei Ruhetage pro Woche) sowie das dazugehörige Jahresprofil für die Gebäudekategorie „Gruppen-, Einzelbüro“.

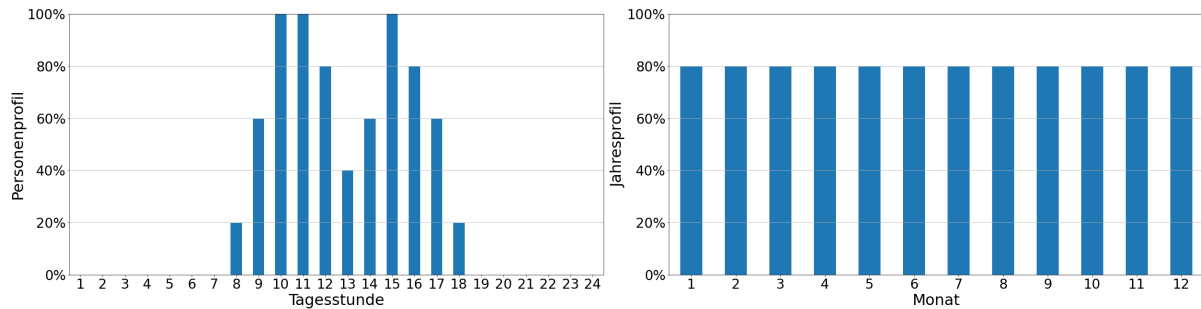


Abbildung 2.2: Personenbelegungsprofil Gruppen-, Einzelbüro [Eigene Darstellung in Anlehnung an SIA 2024:2015]

Die Belegungsprofile sind so aufbereitet und über das Modul *occupancy_reader.py* in *annualSimulation.py* eingebunden, dass für jedes zu simulierende Gebäude in Abhängigkeit seiner Gebädefunktion aus dem zugewiesenen Belegungsprofil die Wahrscheinlichkeit der Anwesenheit von Gebäudenutzern in dieser Stunde zurückgegeben wird. Mithilfe der Anzahl an Personen, für die das Gebäude während der bestimmungsgemäßen Nutzung ausgelegt ist, kann die Anzahl der Personen im Gebäude berechnet werden. Bspw. befinden sich in einem Bürogebäude (Zuweisung des Profils „Gruppen-, Einzelbüro“) mit einer maximalen Personenanzahl von 100 Personen an einem Wochentag im April um 10:30 Uhr 80 Personen.

Zur Berechnung der internen Wärmegewinne wird neben der Personenanzahl im Gebäude der Wärmegewinn pro Person sowie der durchschnittliche Wärmegewinn der technischen Geräteausstattung benötigt (Vgl. Gl. (2.5)). Sowohl in der SIA 2024:2015 als auch in der DIN V 18599-10:2018-09 werden Richtwerte zum Wärmegewinn pro Person und den Wärmegewinnen infolge der technischen Geräteausstattung definiert.^{35,36} Während in der SIA 2024:2015 drei Wertebereiche nach „Standardwert (Typische Planungswerte für Neubauten und Gesamterneuerungen)“, „Zielwert (Optimale Planungswerte für Neubauten und Gesamterneuerungen)“ und „Bestand (Typische Werte für bestehende, energetisch nicht erneuerte Gebäude mit Baujahr vor 1980)“ unterschieden werden, sind in der DIN V 18599-10:2018-09 Werte für die Klassen „gering“, „mittel“ und „hoch“ ausgewiesen.³⁷ Wie beim Vorgehen zur Berechnung der maximalen Personenbelegung kann im DIBS in Abhängigkeit der Gebädefunktion auf die Informationen aus den zwei Normen zurückgegriffen werden, d. h. jedem Gebäude ist zusätzlich ein Nutzungsprofil der DIN V 18599-10:2018-09 zugewiesen. Neben den Nutzungsrandbedingungen für Nichtwohn-

³⁵ Vgl. DIN V 18599-10:2018-09.

³⁶ Vgl. SIA 2024:2015.

³⁷ Vgl. SIA 2024:2015, S. 10.

gebäude werden für die Gebäudekategorien „Studentenhaus“ und „Gemeinschaftsunterkunft (z. B. Flüchtlingsheim, Kaserne, Kloster)“ die Bedingungen für Wohngebäude verwendet (Vgl. Anhang C, Tab. C.1). Die Umsetzung ist so gestaltet, dass der Programmnutzer spezifizieren kann, ob die Größen aus der SIA 2024:2015 oder DIN V 18599-10:2018-09 und welche der drei verschiedenen Klassenwerte verwendet werden sollen. Über einen Verweis in *annualSimulation.py* wird die Funktion des Moduls *norm_Reader.py* aufgerufen und die Größen der spezifizierten Norm zurückgegeben.

In Kapitel 2.1 wurde bereits aufgezeigt, dass die internen Wärmeeinträge infolge der technischen Geräteausstattung im RC_BuildingSimulator ohne Berücksichtigung der Gebäudenutzungszeit berechnet werden. Durch die Einbindung von standardisierten Geräteprofilen im DIBS, wie sie ebenfalls in der SIA 2024:2015 enthalten sind, kann das Nutzerverhalten bezüglich der Nutzung von technischen Geräten abgebildet werden. Die Geräteprofile geben für jede Stunde eines Nutzungstages Aufschluss über die elektrische Leistung „[...] im Verhältnis zur gemittelten elektrischen Leistung der Geräte bei Volllast.“³⁸ Das Modul *occupancy_reader.py* ist daher so gestaltet, dass es zusätzlich zu der Personenbelegung das entsprechende Geräteprofil zurückgibt. Ein exemplarisches Geräteprofil für den Raumnutzungstyp „Gruppen-, Einzelbüro“ ist in Anhang C.3, Abb. C.2 dargestellt.

Ferner kann gem. DIN EN ISO 13790:2008-09 zur Berechnung der internen Gewinne die Verlustwärme infolge der elektrischen Beleuchtung berücksichtigt werden (Vgl. Kap. 1.1).³⁹ Da die elektrische Beleuchtung bei den Nichtwohngebäude eine maßgebliche Rolle spielen kann, wird dieser Umstand an dieser Stelle korrigiert. Folglich wird Gl. (2.5) abgeändert zu:

$$IG(t) = N_{\text{Personen}}(t) \cdot W_{\text{Person}} + W_{\text{Geräte}} \cdot L(t) \cdot A_{\text{EBF}} + D_{\text{elektrisch}}(t) \quad (2.6)$$

Mit:

| | |
|------------------------------|---|
| $N_{\text{Personen}}(t)$: | Anzahl der Personen im Gebäude |
| W_{Person} : | Wärmegewinn pro Person [in W] |
| $W_{\text{Geräte}}$: | Spez. Leistung der technischen Geräte [in W/m ²] |
| $L(t)$: | Leistungsfaktor zur Stunde t nach SIA 2024:2015 |
| A_{EBF} : | Energiebezugsfläche (EBF) ⁴⁰ des Gebäudes [in m ²] |
| $D_{\text{elektrisch}}(t)$: | Elektrischer Beleuchtungsbedarf in Stunde t [in Wh] |

Hierbei wird $D_{\text{elektrisch}}(t)$ seit DIBS Version v.1.1.0 aus der Multiplikation der nutzungsbedingten Beleuchtungsleistung zur ausreichenden Beleuchtungsstärke, der Netto-Raumfläche und der prozentualen Belegung errechnet.

³⁸ SIA 2024:2015, S. 15.

³⁹ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 58.

⁴⁰ Die EBF wird im DIBS als Maß für die konditionierte Nutzungsfläche A_f herangezogen.

2.2.3 Anpassung der solaren Gewinne

Bei den solaren Gewinnen ist die Menge der kurzwelligen Solarstrahlung, die durch die Fensterflächen ins Gebäudeinnere fällt, dort von Gebäudeteilen absorbiert und in Form von langwelliger Strahlung oder Konvektion in den Raum übertragen wird, von besonderem Interesse, da sie Einfluss auf den Energiebedarf hat.⁴¹ Über interne oder externe Sonnenschutzvorrichtungen lässt sich die Solarstrahlung und das Tageslicht im Gebäudeinneren regulieren. Gerade an heißen Sommertagen sind Sonnenschutzvorrichtungen eine gute Möglichkeit, um einfallende Solarstrahlung zu blockieren und damit Überhitzungen (sowie Blendungen) im Innenraum zu vermeiden (und folglich potenziellen Kältebedarf zu reduzieren). Sonnen- und Blendschutz einerseits, ausreichende Tageslichtbeleuchtung andererseits kann über verschiedene Arten der elektrischen Beleuchtungs- und Verschattungssysteme gesteuert werden, z. B. manuell, automatisch oder halbautomatisch.⁴² Die tatsächliche, reale Steuerung der Beleuchtungs- und Verschattungssysteme durch die Gebäudenutzer ist schwer zu analysieren und Daten sind selten verfügbar.⁴³ Infolgedessen entstand ein neuer Zweig im Bereich der Gebäudesimulation, der sich speziell auf die Entwicklung von Verhaltensmodellen zur Abbildung der Benutzersteuerung (z. B. Betätigung von Lichtschaltern oder Steuerung der Jalousien) konzentriert.⁴⁴

Im RC_BuildingSimulator werden keine Sonnenschutzvorrichtungen berücksichtigt. Da im Bereich der Nichtwohngebäude häufig Sonnenschutzvorrichtungen vorzufinden sind, wird die Berechnung der solaren Gewinne im DIBS ergänzt. Sofern ein Gebäude über eine Sonnenschutzvorrichtung verfügt, werden die solaren Wärmeeinträge während der Sommerperiode (angenommen vom 1. April (9:00 Uhr) bis zum 1. Oktober (9:00 Uhr)) pauschal reduziert. Die Funktion `calc_solar_gains()` im Modul `radion.py` enthält den zusätzlichen Parameter `glass_solar_transmittance`. Die Ausprägung des numerischen Parameters ist abhängig von der Art der Sonnenschutzvorrichtung und des Verglasungstyps. Dieser wird bei der Berechnung der solaren Gewinne berücksichtigt, wenn die Außentemperatur während der Sommerperiode eine Temperatur von 24 °C übersteigt. Die Wahl der 24 °C beruht auf der Raum-Solltemperatur im Kühlfall der DIN V 18599-10, welche für über 85 % der 41 Zonennutzungsprofile für Nichtwohngebäude gilt. Die Berechnung erfolgt in Anlehnung an Gl.(2.1) wie folgt:

$$SG(t) = \sum_{n=0}^N (R_N(t) + R_H(t)) \cdot A_{F,n} \cdot g_S \quad (2.7)$$

2.2.4 Möglichkeit einer Nachtlüftung

Gerade während der Sommerperiode übersteigt die Außentemperatur häufig die Gebäudeinnentemperatur. In der Folge kann die von außen nach innen strömende Wärme dazu führen, dass

⁴¹ Vgl. Streicher (2003), S. 116.

⁴² Vgl. Jakobiak (2005), S. 2-9.

⁴³ Vgl. Spitler (2019), S. 33.

⁴⁴ Vgl. Reinhart (2019), S. 221 f.

Mit:

R_N : Anteil der Direktstrahlung zur Stunde t [in Wh/m²]

R_H : Anteil der Diffusstrahlung zur Stunde t [in Wh/m²]

$A_{F,n}$: Fensterfläche je Himmelsrichtung $n = \{0,1,2,3\}$ [in m²]

g_S : Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung bei aktiviertem Sonnenschutz

die Temperatur im Gebäude über die Außentemperatur ansteigt und damit zu unbehaglichen Innentemperaturen für die Gebäudenutzer führt. Durch Maßnahmen wie bspw. Sonnenschutzvorrichtungen oder effiziente Arbeitshilfen kann diesem Temperaturanstieg entgegengewirkt werden. Ein gewisser Temperaturanstieg lässt sich jedoch nicht vermeiden. Eine Möglichkeit, überschüssige Wärme im Gebäude abzuführen, ist die der freien oder mechanischen Nachtlüftung, bei dem die Nachtluft als Wärmesenke genutzt wird. Bei der freien Nachtlüftung strömt kühle Nachtluft über Lufteinlassöffnungen oder geöffnete Fenster, vorzugsweise an gegenüberliegenden Außenwänden, durch das Gebäude, entzieht ihm die tagsüber angesammelte Wärme und senkt die Temperatur im Gebäudeinneren wieder auf ein niedrigeres Temperaturniveau herab.⁴⁵ Durch Druckdifferenzen infolge des Temperaturunterschiedes zwischen dem Gebäudeinnenraum und der Außenumgebung findet auch bei Windstille ein thermisch induzierter Luftaustausch statt.⁴⁶ Im Bereich der Nichtwohngebäude gelten häufig spezielle Anforderungen hinsichtlich des Sturm-, Regen- und Einbruchschutzes, die insbesondere beim Konzept der freien Nachtlüftung von Bedeutung sein können und daher ggf. alternative Lösungen oder gesonderte Vorkehrungen erfordern.⁴⁷ Als Alternative zur freien Nachtlüftung kann die Außenluft auch mechanisch über eine Lüftungsanlage in das Gebäude geführt werden.⁴⁸ Das Konzept der Nachtlüftung stellt eine energieeffiziente Möglichkeit dar, Gebäudemassen während der Nacht abzukühlen und damit den mechanischen Kältebedarf während des Tages zu reduzieren. Sie ist besonders wirksam, wenn das Gebäude eine hohe Speicherkapazität aufweist, denn dann wird die Wärme während des Tages auch in Wänden und Decken akkumuliert.⁴⁹

Im DIBS gibt es die Möglichkeit einer Nachtlüftung. Der Parameter *night_flushing_flow* gibt den Luftwechsel durch die nächtliche Lüftung an. Verfügt ein Gebäude über die Möglichkeit einer Nachtlüftung, kann dies unter Angabe einer angesetzten Luftwechselrate spezifiziert werden. Gibt es keine Nachtlüftung im Gebäude, ist der nächtliche Luftwechsel mit $n = 0 \text{ h}^{-1}$ anzugeben. Die anzusetzende Luftwechselrate hängt von der Ausgestaltung des Nachtlüftungskonzepts ab, wobei die DIN 4108-2:2013 eine Luftwechselrate zwischen $n = 2 \text{ h}^{-1}$ (erhöhte Nachtlüftung) und $n = 5 \text{ h}^{-1}$ (hohe Nachtlüftung) empfiehlt.⁵⁰ In der Literatur werden Luftwechsel zwischen $n = 1 \text{ h}^{-1}$ und $n = 3 \text{ h}^{-1}$ genannt.^{51,52} Die programmtechnische Umsetzung erfolgt durch Anpassung

⁴⁵ Vgl. Ranft und Frohn (2004), S. 104 f.

⁴⁶ Vgl. Fitzner und Finke (2012), S. 16.

⁴⁷ Vgl. Hörner et al. (2012).

⁴⁸ Vgl. Ranft und Frohn (2004), S. 104.

⁴⁹ Vgl. van Treeck et al. (2016), S. 275.

⁵⁰ Vgl. DIN 4108-2:2013-02, S. 30.

⁵¹ Vgl. van Treeck et al. (2016), S. 275 f.

⁵² Vgl. Ranft und Frohn (2004), S. 104 f.

des Lüftungswärmetransferkoeffizienten (Vgl. Kap. 2.2.5).⁵³ Sofern die folgenden Bedingungen erfüllt sind, wird die Nachtlüftung bei der Berechnung des Lüftungswärmetransferkoeffizienten berücksichtigt:

- Nachtlüftung ausschließlich während der Kühlperiode⁵⁴ (angenommen von 1. April, 9:00 Uhr - 1. Oktober, 9:00 Uhr)
- Nachtlüftung ausschließlich von 23:00 Uhr - 6:00 Uhr⁵⁵
- Nachtlüftung wenn Innentemperatur des Gebäudes $>$ Raum-Solltemperatur⁵⁶
- Nachtlüftung wenn Innentemperatur $>$ Außentemperatur $+ 2\text{ °C}$ ⁵⁷

2.2.5 Anpassung des Lüftungswärmetransferkoeffizienten

Der Lüftungswärmetransferkoeffizient berechnet sich nach der in Kapitel 1.1 vorgestellten Gl.(1.5). Im RC_BuildingSimulator wird der Lüftungswärmetransferkoeffizient als zeitunabhängige Größe betrachtet und daher nicht an die Anwesenheit von Personen im Gebäude gebunden. Folglich wird davon ausgegangen, dass RLT-Anlagen durchgängig in Betrieb sind, ohne dass sich notwendigerweise Personen im Gebäude befinden. Dies führt i. d. R. zu einer Überschätzung der Lüftungswärmeverluste und damit verbunden zu einem höheren Raumwärmebedarf. Um diesen Umstand im DIBS zu korrigieren, werden zunächst die Luftvolumenstromelemente bei der Berechnung des Lüftungswärmetransferkoeffizienten aufgeteilt in Infiltration, Fensterlüftung und maschinelle Lüftung. In *building_physics.py* gibt es hierfür die Funktion *calc_h_ve_adj()*, die den Lüftungswärmetransferkoeffizient stündlich neu berechnet. Entscheidend bei der Berechnung sind die Gebäudenutzungszeiten nach SIA 2024:2015. Die DIN V 18599-10:2018-09 weist in den Nutzungsprofilen ebenso typische Gebäudenutzungszeiten aus. Auf diese wird jedoch verzichtet, da die Berechnung des Lüftungswärmetransferkoeffizienten ansonsten im Widerspruch zur Personenbelegung der SIA 2024:2015 steht. Während der Gebäudenutzungszeit wird der Luftvolumenstrom infolge von Fensterlüftung sowie das Luftvolumenstromelement der maschinellen Lüftung (sofern im Gebäude vorhanden) in der Berechnung des Lüftungswärmetransferkoeffizient berücksichtigt. Außerhalb der Gebäudenutzungszeiten wird ausschließlich der Luftwechsel durch Infiltration in die Berechnung einbezogen. Sofern das Gebäude über eine Nachtlüftung verfügt und die in Kapitel 2.2.4 aufgeführten Bedingungen erfüllt sind, wird in diesen Stunden ausschließlich der Luftwechsel durch die nächtliche Lüftung berücksichtigt.

Wird das Gebäude aus Quellen versorgt, bei denen die Zulufttemperatur ungleich der Außentemperatur ist, wie bspw. im Fall eines Luftvolumenstroms aus einer Wärmegewinnungseinheit, wird gem. DIN EN ISO 13790:2008-09 ein Temperaturanpassungsfaktor mit dem Wert $b_{ve,k} \neq 1$ berücksichtigt.⁵⁸ Für die Luftvolumenströme durch Fensterlüftung und Infiltration gilt θ_{sup}

⁵³ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 49 f.

⁵⁴ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 55.

⁵⁵ Vgl. DIN 4108-2:2013-02, S. 30.

⁵⁶ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 55.

⁵⁷ Ranft und Frohn (2004), S. 104.

⁵⁸ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 49 f., 52 f.

$= \theta_e$ und damit $b_{ve,k} = 1$.⁵⁹ Für die Volumenströme durch den Betrieb einer RLT-Anlage ohne Wärmerückgewinnung und die Nachtlüftung wird $b_{ve,k} = 1$ angenommen.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass den Gebäudetypen „Herberge, Ferienheim, Ferienhaus, Hotel/Pension einfach“ und „Sterne-Hotel“ das Nutzungsprofil „Hotelzimmer“ zugewiesen ist (Vgl. Tab. C.1 in Anhang C dieser Arbeit). Nach dem Personenprofil sind während der Zeit von 9:00 Uhr bis 17:00 Uhr keine Personen im Gebäude anwesend. Folglich würde in dieser Zeit der Lüftungswärmetransferkoeffizient ausschließlich auf Basis des Luftwechsels durch Infiltration berechnet werden und damit kaum Luftaustausch im Gebäude stattfinden. Durch die Anpassung der Gebäudenutzungszeiten unter der Annahme, dass sich in der Zeit von 12:00 Uhr bis 17:00 Uhr keine Personen im Gebäude befinden, soll berücksichtigt werden, dass evtl. das Hotelpersonal bei Reinigungsdurchgängen die Fenster öffnet und/oder manche der Gäste ihre Fenster offen bzw. die RLT-Anlage in Betrieb lassen, obwohl sie sich nicht im Gebäude befinden.

2.2.6 Anpassung des Transmissionswärmetransferkoeffizienten

Zur Kopplung der thermischen Masse wird der Transmissionswärmetransferkoeffizient der opaken Bauteile $H_{tr,op}$ in $H_{tr,em}$ und $H_{tr,ms}$ unterteilt (Vgl. 1.1).⁶⁰ Im RC_BuildingSimulator gilt $H_{tr,em} = H_{tr,op}$.⁶¹ Dies steht nicht im Einklang mit den Berechnungen der Norm und ist im DIBS korrigiert.⁶²

Ferner wird im RC_BuildingSimulator bei der Berechnung des Transmissionswärmetransferkoeffizient für opake Bauteile die gesamte Hüllfläche des Gebäudes sowie der Wärmedurchgangskoeffizient der Außenwände zu Grunde gelegt. Eine Differenzierung der Bauteile Außenwand (ober-/unterirdisch), Dach und unterer Gebäudeabschluss findet nicht statt.⁶³ Da die Bauteile zum einen aufgrund ihres Materials und ihrer Dämmung unterschiedliche Wärmedurchgangskoeffizienten aufweisen und zum anderen an verschiedene Medien (Außenluft/Erdreich) angrenzen, sind die darüber abfließende Transmissionswärmeverluste unterschiedlich und die Bauteile gesondert zu berücksichtigen.⁶⁴ Dieser Umstand ist im DIBS korrigiert. Die Hüllfläche wird in eine Dachfläche, einer ober- und unterirdischen Außenwandfläche und die Fläche des unteren Gebäudeabschlusses bzw. der Fußbodenfläche zerlegt. Für die Dachfläche, Außenwände und Fußbodenflächen werden separate Wärmedurchgangskoeffizienten verwendet. Da der untere Gebäudeabschluss und die unterirdischen Außenwände nicht an die Außenluft, sondern an das Erdreich angrenzen, sind die Transmissionswärmeverluste über diese Flächen i. d. R. geringer als bei oberirdischen Bauteilen.⁶⁵ Sofern „[...] die Temperatur auf der anderen Seite des Bauteils nicht gleich der Temperatur der Außenumgebung ist [...]“, muss für diese Bauteile gem. DIN EN ISO 13790:2008-09 ein Anpas-

⁵⁹ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 49 f., 52 f.

⁶⁰ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 79.

⁶¹ Vgl. Jayathissa (2020).

⁶² Um zu vermeiden, dass $H_{tr,em}$ negative Werte annimmt gilt im DIBS $\max\{0, \frac{1}{\frac{1}{H_{tr,op}} - \frac{1}{H_{tr,ms}}}\}$

⁶³ Vgl. Jayathissa (2020).

⁶⁴ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 44.

⁶⁵ Vgl. Laasch und Laasch (2013), S. 521.

sungsfaktor mit dem Wert $b_{tr,x} \neq 1$ berücksichtigt werden.⁶⁶ Dies ist für die an das Erdreich angrenzenden Bauteile wie dem Fußboden und die unterirdischen Außenwänden der Fall.

Der Transmissionswärmetransferkoeffizient der opaken Bauteile berechnet sich damit wie folgt:

$$H_{tr,op} = U_{Dach} \cdot A_{Dach} + U_{Wand} \cdot A_{Wand,o} + F_W \cdot U_{Wand} \cdot A_{Wand,u} + F_G \cdot U_{Boden} \cdot A_{Boden} \quad (2.8)$$

Mit:

- U_{Dach} : Mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient Dach [in W/(m²K)]
- U_{Wand} : Mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient Außenwand [in W/(m²K)]
- U_{Boden} : Mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient Boden [in W/(m²K)]
- A_{Dach} : Dachfläche [in m²]
- $A_{Wand,o}$: Summe der oberirdischen Außenwandfläche [in m²]
- $A_{Wand,u}$: Summe der unterirdischen Außenwandfläche [in m²]
- A_{Boden} : Fläche des unteren Gebäudeabschlusses [in m²]
- F_W : Temperaturanpassungsfaktor für unterirdische Außenwände (anstelle von $b_{tr,Wand,u}$)
- F_G : Temperaturanpassungsfaktor des Fußbodens (anstelle von $b_{tr,Boden}$)

2.2.7 Erweiterung der Erzeuger- und Übergabesysteme

Die Energiezufuhr der Heiz- und Kühlanlage deckt die Menge an Nutzenergie für Raumwärme- und Kühlung im Gebäude. Zur Berechnung der Endenergie Raumwärme wird die Erzeuger-Aufwandszahl der entsprechenden Heizanlage herangezogen.⁶⁷ Um die im Rahmen des Projekts ENOB:dataNWG in den Gebäuden erfassten Anlagen abbilden zu können, enthält der DIBS verschiedene Wärmeerzeuger. Die einzelnen Anlagenklassen sind an die Ausprägungen des Teilenergiekennwerte (TEK)-Tools 9.24 angelehnt, da sich die erhobenen Primärdaten ebenfalls an diesen orientierten (Vgl. Kap. 3.1 und 4.1). Die Erzeugeraufwandszahlen der einzelnen Wärmeerzeuger orientieren sich am TEK-Tool 9.24.⁶⁸ Die Methodik zur Berechnung des Coefficient of Performance (COP) für Erdreich- und Luftwärmepumpen basiert auf der Regressionsanalyse von Herstellerdaten und ist mit der methodischen Umsetzung im RC_BuildingSimulator identisch.⁶⁹ Die Wärmequellentemperatur des Erdreichs gelten gem. Viessmann (2011). Der DIBS enthält ferner Erdgas-BHKW-Anlagen mit den Kennzahlen der ASUE (2011), S. 9. Eine Übersicht über alle Wärmeerzeuger befindet sich in Tab. C.2 in Anhang C. Des Weiteren kann im DIBS zwischen drei verschiedenen Kompressionskältemaschinen und einer Absorptionskältemaschine ausgewählt werden. Bei allen Kompressionskältemaschinen wird davon ausgegangen, dass die für

⁶⁶ DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 44.

⁶⁷ Die Aufwandszahl ist definiert als „Verhältnis von Aufwand zu erwünschtem Nutzen (Bedarf) bei einem Energiesystem.“ (DIN V 4701-10:2003-08, S. 12).

Demnach folgt: Endenergie = Nutzenergie · Erzeuger-Aufwandszahl

⁶⁸ Institut Wohnen und Umwelt (2020a), Vgl.

⁶⁹ Vgl. Staffell et al. (2012), S. 9301.

den entsprechenden Prozess notwendige mechanische Energie zum Betrieb des Kompressors aus elektrischem Strom bereitgestellt wird. Der zum Heizen/Kühlen benötigte Elektrizitätsbedarf wird über die entsprechenden Leistungszahlen der SIA 382/1 Energy Efficiency Ratio (EER) bzw. EER+ einer Kältemaschine mit einer Erzeugerleistung von 100 kW abgeschätzt (Vgl. Anhang C, Tab. C.3). Bei luftgekühlten Kompressionskältemaschinen gelten die verwendeten EER-Werte für die gesamte Kältemaschine. Bei wassergekühlten Anlagen werden, um den Elektrizitätsbedarf der Rückkühlung (umfasst zusätzliche Pumpen und Ventilatoren) einzubeziehen, die entsprechenden EER+-Werte verwendet.⁷⁰ Demgegenüber stehen thermisch angetriebene Absorptionskältemaschinen. Die für den Sorptionskälteprozess benötigte Antriebswärme kann aus verschiedensten Quellen, bspw. aus industrieller Abwärme, stammen.⁷¹ Da Absorptionskältemaschinen im Vergleich zu Kompressionskältemaschinen i. d. R. einen geringeren Wirkungsgrad haben, wird davon ausgegangen, dass eine Absorptionskältemaschinen nur eingesetzt wird, wenn ein „kostenloser“ Zugang zu Wärme besteht.⁷² Über den Elektrizitätsbedarf beeinflusst der Betrieb einer Kompressionskältemaschine folglich den Endenergiebedarf, während eine Absorptionskältemaschine keinen Einfluss auf den Endenergiebedarf hat.

Je nach Art des vorherrschenden Wärme- bzw. Kälteübergabesystems wird der Wärmestrom $\Phi_{\text{HC,nd}}$ einem unterschiedlichen Temperaturknoten im 5RC1-Modell zugeführt (Vgl. 1.1). Unterschieden wird zwischen der Zufuhr zum Lufttemperaturknoten Θ_{air} , dem Temperaturknoten der innenliegenden Oberflächen Θ_s oder dem Temperaturknoten der Gebäudemasse Θ_m . Die Zuweisungen der einzelnen Wärme- und Kälteübergabesysteme zu den entsprechenden Temperaturknoten im DIBS sind für die Tieferenerhebung in Tab. D.1 und D.2 bzw. für die Breiterenerhebung in Tab. D.5 und D.6 im Anhang dargestellt.

Anfallende Speicherungs-, Verteilungs-, Übergabe- und Regelverluste der entsprechenden Raumheiz- und -kühlanlagen werden aus Gründen der Vereinfachung im Rahmen des DIBS nicht berücksichtigt.

2.2.8 Abschätzung des stündlichen Warmwasserbedarfs

Die Abschätzung des Warmwasserbedarfs basiert auf den Teilenergiekennwerten (TEKs) für den Warmwasserverbrauch nach Gebäudenutzungskategorie aus der "Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchswerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand" Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat (o. D.) verfügbar unter: <https://www.bundesanzeiger.de/pub/publication/GZb2vlJQJe1XCpSyM6h?0>. Die spezifischen Verbrauchsvergleichswerte für Warmwasser pro Quadratmeter Energiebezugsfläche und Jahr werden durch Division durch die Personenvollnutzungsstunden (Occupancy_Full_Usage_Hours) der entsprechenden Gebäudenutzungskategorie auf Stundenwerte in Abhängigkeit der personellen Gebäudeausnutzung gebracht. Die stündlichen Warmwasserbedarfe

⁷⁰ Vgl. Bundesamt für Energie (2017), S. 4.

⁷¹ Vgl. Recknagel und Sprenger (2009), S. 1964.

⁷² Vgl. Frey (2019), S. 225.

werden dann über die stunden- und ausnutzungsspezifischen TEKs, durch Multiplikation mit den entsprechenden Nutzerstundenausnutzung errechnet.

2.2.9 Berechnung der Treibhausgasemissionen

Zur Bewertung von der Umwelt und insbesondere der Klimawirksamkeit des Gebäudebetriebs bieten die emittierten Treibhausgasemissionen (Global Warming Potential) eine wichtige Grundlage. Im DIBS werden die Treibhausgasemissionen (THGE) über die CO₂ Faktoren aus dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) GEG2020 (2020) berechnet. Dazu werden die Endenergiebedarfe (Heizwerte) mit ihren zugehörigen Energieträgern mit den entsprechenden THGE-Faktoren multipliziert. Die THGE aller detaillierten Gewerke werden mit der Kennung "GWP" in den DIBS Ergebnissen abgelegt. Die Beschreibung der Berechnung der Heizwertbedarfe findet sich Kapitel 2.2.11.

2.2.10 Primary Energy Calculation

Following the calculation of the greenhouse gas emissions (GHGE) the primary energy of all energy demands is calculated using the final energy factors set in the German Building Energy Ordinance (GEG) GEG2020 (2020). As these factors are based on the heating energy values their calculation was in this context also implemented to the DIBS (see section 2.2.11). The heating value-based energy demands are, analogous to the calculation of the GHGE, multiplied by the primary energy factors. The primary energy demand results are saved under the general demand name followed by the appendix 'PE'.

2.2.11 Calculation of the energy demand based on heating values

The DIBS demand calculation is based on energy efficiency factors (Anlagenaufwandszahlen) which are based on calorific energy values (Hs). However, the GEG greenhouse gas emission and primary energy factors (PE) are both heating values (Hi) based. Therefore before the calculation of both the GHGE and the PE the heating value-based demands need to be calculated based on the calorific value-based demands. This is accomplished by the application of the GEG-defined relation between the calorific and heating value GEG2020 (2020). Therefore the calorific value energy results are not specially named within the DIBS calculation process, but in the annualResults result file these energies are labelled by adding the [kWhHs] as the unit. The heating energy values are labelled with 'Hi' within the DIBS model and in the annualResults file.

Kapitel 3

Validierung der Simulationsumgebung DIBS

Um festzustellen, ob die in Kapitel 2.2 vorgestellte Simulationsumgebung DIBS mit seinen angepassten Änderungen plausible Ergebnisse – sowohl auf Ebene der Einzelgebäude als auch auf Ebene einzelner Gebäudekategorien – liefert, werden dessen Berechnungsergebnisse anhand eines geeigneten Vergleichsmaßstabs überprüft. Im Rahmen des Projekts ENOB:DataNWG fand eine sog. Tiefenerhebung statt, in der 464 Gebäude vor Ort untersucht und neben den Verbrauchsdaten auch diverse energetische Merkmale erfasst wurden.¹ Zu Beginn dieses Kapitels wird zunächst der Datensatz der Tiefenerhebung, wie er von Mitarbeitern des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU's) erzeugt wurde, knapp vorgestellt. Auf dieser Basis wird ein Datensatz erstellt, der als Eingangsdatensatz zur Validierung des DIBS dient. Die Simulationsergebnisse werden anschließend den gebäudespezifischen gemessenen Verbräuchen.

3.1 Erzeugung der Eingangsparameter aus Daten der Tiefenerhebung

Im Rahmen der Tiefenerhebung des Projekts ENOB:dataNWG wurden an den untersuchten Gebäudesituationen verschiedene Parameter hinsichtlich der energetischen Beschaffenheit von Gebäudehülle und vorherrschender Anlagentechnik, nutzungsbedingten Kenngrößen sowie gemessene Energieverbräuche (Wärme/Strom) erhoben.² Jedes Gebäude wurde anhand der Grundrisspläne in verschiedene Gebäude-, bzw. Nutzungszonen unterteilt. Je nach Gebäude sind dies zwischen einer und maximal 26 Zonen. Innerhalb dieser Zonen wurde ein typischer Raum, ein sog. exemplarischer Zonenraum, festgelegt. Für diese Zonenräume wurden nutzungsbedingte Merkmale erhoben. Bei den Vor-Ort-Untersuchungen konnten teilweise nicht alle Größen erfasst werden, sodass gelegentlich Antwortausfälle im Datensatz vorkommen. In diesen Fällen wird bei der Erstellung des Eingangsdatensatzes entweder die gesamte Beobachtung nicht verwendet oder es werden geeignete Annahmen für die Antwortausfälle getroffen. Wie im Detail damit verfahren wird, ist an den entsprechenden Stellen erläutert. Die Aufstellung aller erfassten Parameter der

¹ Vgl. Institut Wohnen und Umwelt (2020b).

² Vgl. Institut Wohnen und Umwelt (2020b).

Vor-Ort-Erfassungen ist der entsprechenden Variablendokumentation in den elektronischen Anlagen dieser Arbeit zu entnehmen.³ Am IWU wurde mithilfe des TEK-Tools für jedes Gebäude der Energiebedarf errechnet.⁴ Die Ergebnisse der TEK-Tool Bedarfsrechnungen sowie die erfassten Verbrauchsdaten dienen als Benchmark zur Einschätzung des DIBS.

Die nachfolgenden Ausführungen sollen Aufschluss darüber geben, wie die Eingangsdaten generiert werden. Als Datengrundlage hierfür dient in erster Linie der Datensatz der Tieferenerhebung. Bei auftretenden Informationslücken oder etwaigen Ungereimtheiten wird auf Informationen aus dem Datensatz der Breiterehebung und auf Geoinformationen des ENOB:dataNWG Projektpartners Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR) zurückgegriffen. Ferner werden diverse Verfahren und Anhaltswerte aus verschiedenen Normen verwendet. Als Ergebnis dieses Kapitels steht ein Validierungsdatensatz mit den für den DIBS benötigten Eingangsparametern der zu simulierenden Gebäude. Die Erzeugung des Datensatzes wird in Form eines Stapelskripts (geschrieben in Python 3.7/3.8) realisiert. Hierfür ist dem Skript *annualSimulation.py* das Modul *dataPreprocessingTE.py* vorangestellt.

Eine Übersicht der folgenden Parameterbeschreibung befindet sich in Tab. A.2 in Anhang A dieser Arbeit.

- *scr_gebauede_id*: Gebäude-ID
Sowohl im Datensatz der Tieferenerhebung als auch im Datensatz der Breiterehebung wird jedes Gebäude mit seiner einmaligen Gebäude-ID geführt. Die entsprechenden Gebäude-IDs werden direkt in den neuen, aufzubauenden Datensatz für die Validierung überführt.
- *plz*: Postleitzahl des Gebäudestandortes
Für jedes Gebäude im Tieferenerhebungs-Datensatz ist die entsprechende Postleitzahl des Gebäudestandortes ausgewiesen. Diese wird direkt in den Validierungsdatensatz überführt.
- *hk_geb* und *uk_geb*: Gebäudefunktion Haupt-/Unterkategorie
Im Datensatz der Tieferenerhebung ist für jede Gebäudezone ein Nutzungstyp nach DIN V 18599-10:2018-09 festgelegt. Da der DIBS Informationen auf Basis der überwiegenden Gebäudefunktion heranzieht, werden die Variablen *hk_geb* und *uk_geb* aus dem Datensatz der Breiterehebung übernommen. Dort ist jedes Gebäude nach seiner überwiegenden Funktion geführt.
- *max_occupancy*: Maximale Anzahl der Personen im Gebäude
Im Datensatz der Tieferenerhebung ist neben der Fläche und der mittleren Personenbelegungsdichte [in m²/Person] der einzelnen Zonen auch die Fläche und die maximale Personenbelegung des exemplarischen Zonenraums erfasst. Aus diesen Größen lässt sich die Anzahl der Personen im Gebäude berechnen. Im Rahmen der Breiterehebung wurden die Teilnehmer der Befragung nach der maximalen Anzahl der Personen gefragt, für die das Gebäude während der bestimmungsgemäßen Nutzung ausgelegt ist. Da zwischen der errechneten Personenbelegung aus der

³ Vgl. Institut Wohnen und Umwelt (2020c).

⁴ Vgl. Institut Wohnen und Umwelt (2020b).

Tiefenerhebung und der abgefragten Größe aus der Breitenerhebung Diskrepanzen bestehen, werden für die Erstellung des Validierungsdatensatzes die Werte aus der Breitenerhebung verwendet. Die Diskrepanzen sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass in der Tiefenerhebung die Anzahl der Personen erfasst wurde, die aufgrund von (Sicherheits-)Vorschriften maximal anwesend sein darf. Diese wird im Alltag nicht oder nur äußerst selten erreicht.

- *wall_area_og*: Summe der oberirdischen Außenwandflächen

Im Rahmen der Fassadenabwicklung wird auf die Geodatenanalyse des IÖR zurückgegriffen.⁵ Dieser Geodatenatz enthält aufbereitete Informationen für jedes Gebäude im Projekt, abgeleitet aus den georeferenzierten Umringspolygonen des entsprechenden Gebäudegrundrisses. Zur Berechnung der oberirdischen Außenwandflächen werden aus diesem Datensatz Angaben zur Fassadenlänge der Gebäude je Haupthimmelsrichtung entnommen. Zur Berechnung der Fassadenfläche je Himmelsrichtung wird die Länge je Himmelsrichtung mit der mittleren Gebäudehöhe multipliziert. Zur Bestimmung der mittleren Gebäudehöhe stehen zwei Ansätze zur Verfügung. Zum einen beinhaltet der Datensatz des IÖR eine flächengemittelte Höhe der Gebäude, zum anderen kann die mittlere Gebäudehöhe aus dem Datensatz der Tiefenerhebung generiert werden. Für den Validierungsdatensatz wird zunächst der zweite Ansatz verwendet, da mit diesem präzisere Ergebnisse zu erwarten sind. Die mittlere Gebäudehöhe ergibt sich aus Multiplikation der mittleren Geschosshöhe mit der mittleren Anzahl der oberirdischen Vollgeschosse (ohne Dachgeschoss). Während die mittlere Anzahl der oberirdischen Vollgeschosse direkt aus dem Datensatz der Tiefenerhebung entnommen werden kann, wird die mittlere Geschosshöhe über die lichte Raumhöhe und die Fläche je Zone unter Berücksichtigung des Umrechnungsfaktors 0,86 von Außen- auf Innenmaßbezug für vertikale Längen (Netto-/Brutthöhe)⁶ aus den Variablen der Tiefenerhebung errechnet. Um die Fläche der Außenwände zu bestimmen, werden von der Fassadenfläche je Himmelsrichtung die Fensterflächen je Himmelsrichtung (Vgl. Punkt *Summe der Fensterflächen je Himmelsrichtung* in diesem Kapitel) abgezogen und die resultierenden Außenwandflächen aufsummiert.

- *wall_area_ug*: Summe der unterirdischen Außenwandflächen

Um die Wärmeverluste über einzelne Bauteilflächen berücksichtigen zu können, ist die Differenzierung zwischen ober- und unterirdischen Außenwandflächen notwendig (Vgl. Kap. 2.2.6). Zur Berechnung der unterirdischen Außenwandflächen wird für jede Himmelsrichtung die Fassadenlänge mit der Anzahl der unterirdischen Geschosse (z. B. Keller, Tiefgaragen) und der mittleren Geschosshöhe multipliziert. Die Anzahl der unterirdischen Geschosse kann direkt aus dem Datensatz der Tiefenerhebung entnommen werden. Die gesamte unterirdische Außenwandfläche ergibt sich als Summe über alle Flächenorientierungen. Besitzt ein Gebäude keine unterirdischen Außenwandflächen, wird im Validierungsdatensatz an den entsprechenden Stellen eine null verzeichnet.

- *window_area_north*, *window_area_east*, *window_area_south*, *window_area_west*: Summe der Fensterflächen je Himmelsrichtung

⁵ Vgl. Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (2020).

⁶ Vgl. Hörner und Knissel (2014), S. 4.

Der Fensterflächenanteil an der Fassade nach Himmelsrichtungen ist in der Tiefenerhebung in den Stufen 25 %, 50 %, 75 % und 100 % erfasst. Die Berechnung der Fensterflächen je Orientierung erfolgt durch Multiplikation der entsprechenden Fassadenfläche mit dem entsprechenden Fensterflächenanteil.

- *net_room_area*: Netto-Raumfläche⁷ des Gebäudes
Aus der Tiefenerhebung ist der Anteil der thermisch konditionierten Fläche des Gebäudes sowie die EBF bekannt. Die Netto-Raumfläche ergibt sich aus der Division der EBF durch den Anteil der thermisch konditionierten Fläche. Die Netto-Raumfläche des Gebäudes wird im DIBS bei der Berechnung des elektrischen Beleuchtungsbedarfs als Basis für die beleuchtete Fläche (Vgl. Gl. (2.4)) herangezogen.
- *energy_ref_area*: Energiebezugsfläche
Die EBF wurde im Rahmen der Tiefenerhebung Vor-Ort erfasst. Ferner steht eine errechnete EBF des TEK-Tools zur Verfügung. Um später die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleisten zu können, wird für den Validierungsdatensatz die EBF des TEK-Tools herangezogen.
- *base_area*: Fläche des unteren Gebäudeabschlusses
Die Bauteilfläche zur Berechnung der Transmissionswärmeverluste über den unteren Gebäudeabschluss (Kellerdecke resp. Bodenplatte) berechnet sich aus der EBF und der mittleren Anzahl der oberirdischen Geschosse unter Berücksichtigung des mittleren Faktors zur Umrechnung der Bruttogrundfläche⁸ auf die Nettogrundfläche (dient der Herstellung des Außenmaßbezugs).⁹

$$A_{\text{Boden}} = \frac{A_{\text{EBF}}}{n_G \cdot f_{\text{NGF/BGF}}} \quad (3.1)$$

Mit:

- A_{EBF} : Energiebezugsfläche [in m²]
 n_G : Mittlere Anzahl der oberirdischen Geschosse
 $f_{\text{NGF/BGF}}$: Mittlerer Umrechnungsfaktors von Brutto- auf Nettogrundfläche
[Pauschalwert von 0,87 nach Hörner und Knissel (2014)]

Ferner dient die Fläche des unteren Gebäudeabschlusses im DIBS zur Bestimmung des Gebäudevolumens.

- *roof_area*: Dachfläche
Die Dachfläche – unter Berücksichtigung des beheizten Anteils des Dachgeschosses – dient als Bauteilfläche zur Berechnung der Transmissionswärmeverluste über den oberen Gebäudeabschluss. Aus der Tiefenerhebung ist der Dachtyp („Flachdach/flachgeneigtes Dach“, „Steildach (mit beheiztem Dachgeschoss)“, „Steildach (mit teilweise beheiztem Dachgeschoss)“ oder

⁷ Die Netto-Raumfläche umfasst „sämtliche Grundflächen der nutzbaren Räume aller Grundrissebenen des Bauwerks.“ (DIN 277-1:2016-01, S. 4.)

⁸ Die Bruttogrundfläche umfasst „sämtliche Grundflächen der aufgehenden Baukonstruktionen.“ (DIN 277-1:2016-01 (o. D.), S. 4.)

⁹ Vgl. Hörner und Knissel (2014), S. 3.

„oberste Geschossdecke zu unbeheiztem Dachgeschoss“) bekannt. Für Flachdächer und im Fall einer obersten Geschossdecke zum unbeheizten Dachgeschoss entspricht die Dachfläche der Fläche des unteren Gebäudeabschlusses. Bei Steildächern wird die Dachflächenvergrößerung infolge der Dachneigung sowie der beheizte Anteil des Dachgeschosses in der Berechnung berücksichtigt.¹⁰

$$A_{\text{Dach}} = n_{\text{DG}} \cdot A_{\text{Boden}} \cdot f_{\text{DG}} + (1 - n_{\text{DG}}) \cdot A_{\text{Boden}} \quad (3.2)$$

Mit:

- A_{Boden} : Fläche des unteren Gebäudeabschlusses [in m²]
- n_{DG} : Teilbeheizungsfaktor Dachgeschoss [Steildach (mit beheiztem Dachgeschoss): $n_{\text{DG}} = 1$; Steildach (mit teilweise beheiztem Dachgeschoss): $n_{\text{DG}} = 0,5$; Flachdach/oberste Geschossdecke: $n_{\text{DG}} = 0$]¹¹
- f_{DG} : Neigungsfaktor Flachdach [Steildach: $f_{\text{DG}} = 1,51$; Flachdach/oberste Geschossdecke: $f_{\text{DG}} = 1$]¹²

- *building_height*: (mittlere) Gebäudehöhe
Parametergenerierung siehe *wall_area_ok*: Summe der oberirdischen Außenwandflächen
- *lighting_load*: elektrische Leistung der Beleuchtung
Für die Abschätzung der elektrischen Beleuchtungsleistung wird das Tabellenverfahren nach DIN V 18599-4:2018-09 verwendet.¹³ Hierfür werden dem Datensatz der Tiefenerhebung die Variablen Zonenfläche, Nutzungstyp, Beleuchtungsart („direkt“, „direkt/indirekt“, „indirekt“) sowie der Typ der überwiegenden Lampenart für jede Zone entnommen. Unterschieden wird dabei zwischen 15 verschiedenen Lampentypen wie bspw. Halogenglühlampen, verschiedenen Leuchtstofflampen, LED-Ersatzlampen etc. Die spezifische elektrische Bewertungsleistung ergibt sich nach Gl. (11) der DIN V 18599-4:2018-09:

$$p_j = p_{j,\text{lx}} \cdot \bar{E}_m \cdot k_{\text{WF}} \cdot k_A \cdot k_L \cdot k_{\text{VB}} \quad (3.3)$$

Mit:

- $p_{j,\text{lx}}$: spezifische elektrische Bewertungsleistung [in W/m²lx]
- \bar{E}_m : Wartungswert der Beleuchtungsstärke nach DIN V 18599-10:2018-09 [in lx]
- k_A : Faktor zur Berücksichtigung des Bereichs der Sehaufgabe
- k_L : Faktor für nicht stabförmige Leuchtstofflampen nach Tab. 6 DIN V 18599-4:2018-09
- k_{WF} : Faktor zur Berücksichtigung der Wartung
- k_{VB} : Faktor zur Berücksichtigung der Beleuchtung vertikaler Flächen nach DIN V 18599-10:2018-09

Die Werte für \bar{E}_m , k_A und k_{VB} basieren auf den Nutzungsprofilen der DIN V 18599-10:2018-09. In Abstimmung mit DIN V 18599-4:2018-09 gilt $k_{\text{WF}} = 0,8 / \text{WF}$. In der Norm werden

¹⁰ Vgl. Hörner und Knissel (2014), S. 2-4.

¹³ Vgl. DIN V 18599-4:2018-09, S. 24-28.

Werte je nach Alterungsprozessen bis zur nächsten Wartung der Beleuchtungsanlagen für WF zwischen 0,5 und 0,8 vorgeschlagen. Da keine weiteren Informationen zum Wartungsfaktor bekannt sind, wird, wie in der Norm bei Nichtkenntnis empfohlen, $WF = 0,67$ angesetzt.¹⁴ Die Bestimmung der spezifischen elektrischen Bewertungsleistung $p_{j,lx}$ erfolgt in Abhängigkeit der entsprechenden Beleuchtungsart und des Raumindex k nach Tab. 5 der Norm.¹⁵ Die Werte für k basieren auf den entsprechenden Nutzungsprofilen der DIN V 18599-10:2018-09. Fehlende k -Werte werden (im Einklang mit den Vorschriften der DIN V 18599-4:2018-09) interpoliert.¹⁶ Bei der Unterscheidung der 15 verschiedenen Lampenarten werden in der Tieferhebung auch Informationen über das verbaute Vorschaltgerät berücksichtigt. Die entsprechenden Werte für k_L ergeben sich in Abhängigkeit der Lampenart und des entsprechenden Vorschaltgeräts nach Tab. 6 der Norm. Damit resultiert für jede Zone ein Wert p_j . Um die mittlere Beleuchtungsleistung eines gesamten Gebäudes zu bestimmen, wird die Beleuchtungsleistungen aller Zonen flächengewichtet gemittelt.

- *lighting_control*: Mindestbeleuchtungsstärke

Die Angaben zur Mindestbeleuchtungsstärke basieren auf den Wartungswerten der Beleuchtungsstärke aus den entsprechenden Nutzungsprofilen der DIN V 18599-10:2018-09.¹⁷

- *lighting_utilisation_factor*: Lichtausnutzungsfaktor

Für die Berechnung des stündlichen Beleuchtungsbedarfs wird im RC_BuildingSimulator und auch im DIBS die Menge an Tageslicht ermittelt, um feststellen zu können, ob diese ausreicht, die Mindestbeleuchtungsstärke zu gewährleisten (Vgl. 2.1). Die Tageslichtmenge ist u. a. vom Lichtausnutzungsfaktor abhängig, der wiederum von den geometrischen Proportionen der Räumlichkeiten (charakterisiert durch den Raumindex), dem Reflexionsgrad von Decken- und Wandoberflächen, der Fenstergestaltung und der Position im Raum abhängt. Szokolay (1980) empfiehlt, die Verwendung der verwendeten Total-Flux-Method auf den Lichteinfall durch Dachfenster zu beschränken. Für seitlich angebrachte Fenster liefere die Split-Flux-Methode zuverlässigere Ergebnisse.¹⁸ Jayathissa et al. (2017) verwenden den RC_BuildingSimulator mit der implementierten Total-Flux-Method auch für an den Außenwänden angebrachte Fenster und stellen im Vergleich zu einer komplexeren Tageslichtberechnungen nur geringfügige Abweichungen fest.¹⁹ Für die Gebäude in der Tieferhebung sind keine Informationen über den Reflexionsgrad von Decken- und Wandoberflächen bekannt. Da im DIBS der Beleuchtungsbedarf ausschließlich Berücksichtigung in der Berechnung der internen Gewinne findet und nicht als eigenständiges Ergebnis ausgewiesen wird, wird mangels Informationen der Standardwert der ursprünglichen RC_BuildingSimulator-Version von 0,45 beibehalten.²⁰

- *lighting_maintenance_factor*: Wartungsfaktor der Verglasung

Der Wartungsfaktor berücksichtigt die Verschmutzung sowie andere Abnutzungserscheinungen

¹⁴ Vgl. DIN V 18599-4:2018-09, S. 25.

¹⁵ Vgl. DIN V 18599-4:2018-09, S. 24.

¹⁶ Vgl. DIN V 18599-4:2018-09, S. 24.

¹⁷ Vgl. DIN V 18599-10:2018-09, S. 26-30.

¹⁸ Vgl. Szokolay (1980), S. 104.

¹⁹ Vgl. Jayathissa et al. (2017), S. 730.

²⁰ Vgl. Jayathissa (2020).

der Verglasung und basiert auf den von Szokolay (1980) vorgeschlagenen Werten. Der Faktor wird nach Gebäudestandort („Außerhalb eines Industriegebiets“/„Innerhalb eines Industriegebiets“) sowie nach Raumnutzung („schmutzanfällige Tätigkeiten“/„saubere Tätigkeiten“) und Fensterneigung („horizontal“/„vertikal“/„geneigt“) festgelegt.²¹ Da im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich vertikal ausgerichtete Fenster berücksichtigt werden, stehen folglich 4 Werte zur Auswahl. Die Zuordnungen der Werte für die einzelnen Gebäudeklassen basieren auf eigenen Annahmen hinsichtlich des Sauberkeitsstandards im Gebäude. Für „Produktions-, Werkstatt-, Lager- oder Betriebsgebäude“ wird der Wert 0,8 verwendet („schmutzanfällige Tätigkeiten“ und „außerhalb eines Industriegebiets“), während für alle anderen Gebäudeklassen 0,9 herangezogen wird („sauber“ und „außerhalb eines Industriegebiets“).

- *glass_solar_transmittance*: Energiedurchlassgrad der Verglasung

Im Rahmen der Tieferhebung ist der Verglasungstyp („Ein-Scheiben-Verglasung“, „Zwei-Scheiben-Verglasung“, „Wärmedämmglas zweifach“, „Wärmedämmglas dreifach“, „Sonenschutzglas dreifach“) und der U-Wert je Orientierung erfasst. Ein Gebäude kann an allen Fassadenseiten mit dem gleichen Verglasungstyp (und ggf. U-Wert) ausgestattet sein. Dies muss aber nicht zwangsläufig der Fall sein. Daher werden für die Fenster einer Fassadenseite zunächst separate Gesamtenergiedurchlassgrade bestimmt. Die Angaben zum Verglasungstyp und U-Wert werden mit den Kennwerten der Tab. 8 der DIN V 18599-2:2018-09 verknüpft.²² Dabei erfolgt die Auswahl des Gesamtenergiedurchlassgrads in erster Priorität nach dem Verglasungstyp, dann nach dem entsprechenden U-Wert der Verglasung. Wenn es keinen dazugehörigen U-Wert in der Norm gibt, wird der konservativere Wert gewählt und der dazugehörige Gesamtenergiedurchlassgrad aus der Norm verwendet. Als Resultat ergibt sich für jede Orientierung ein Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung. Der Gesamtenergiedurchlassgrad des gesamten Gebäudes werden anschließend als flächengewichtetes Mittel errechnet.

- *glass_solar_shading_transmittance*: Energiedurchlassgrad der Verglasung bei aktiviertem Sonnenschutz

Aus der Tieferhebung ist ferner die Art der außen- oder innenliegenden Sonnenschutzvorrichtung je Himmelsrichtung bekannt. Zur Ermittlung des Gesamtenergiedurchlassgrads bei aktiviertem Sonnenschutz wird die gleiche Vorgehensweise wie bei der Ermittlung des Energiedurchlassgrads der Verglasung ohne Sonnenschutz gewählt. Dementsprechend wird der Energiedurchlassgrad je Himmelsrichtung aus Tab. 8 der DIN V 18599-2:2018-09 in Abhängigkeit des Verglasungstyps, des U-Wertes der Verglasung und der Art der Sonnenschutzvorrichtung bestimmt. Die Energiedurchlassgrade je Orientierung werden flächengewichtet gemittelt. Hierbei sei angemerkt, dass nicht über die gesamte Fensterfläche gemittelt wird, denn ein Gebäude besitzt zwar häufig an allen 4 Fassadenseiten Fenster, jedoch nur bspw. an 3 Fassadenseiten eine Sonnenschutzvorrichtung. Daher wird für das flächengewichtete Mittel die entsprechende Fensterfläche nur einbezogen, wenn an dieser auch ein Sonnenschutz vorhanden ist.

²¹ Vgl. Szokolay (1980), S. 188.

²² Vgl. DIN V 18599-2:2018-09, S. 75 f.

- *glass_light_transmittance*: Lichttransmissionsgrad

Der Lichttransmissionsgrad wird nach DIN V 18599-4:2018-09, Gl. (32) in Verbindung mit Gl. (33) berechnet:²³

$$\tau_{\text{eff,SNA},j} = \tau_{\text{D65,SNA}} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \quad (3.4)$$

Mit:

$\tau_{\text{D65,SNA}}$: Lichttransmissionsgrad der Fassadenverglasung für senkrechten Lichteinfall

k_1 : Minderungsfaktor für Rahmen und Versprossung

k_2 : Minderungsfaktor für Verschmutzung

k_3 : Minderungsfaktor für nicht senkrechten Lichteinfall auf die Fassade

Zur Bestimmung von k_1 ist die Fläche der Konstruktionsteile und der Rohbauöffnung notwendig.²⁴ Da diese Informationen aus der Tiefenerhebung nicht bekannt sind, wird, wie in der Norm empfohlen mit $k_1 = 0,7$ gerechnet.²⁵ Für den Minderungsfaktor durch Verschmutzung k_2 werden die bereits angesprochenen Werte aus Szokolay (2008) verwendet.²⁶ Für k_3 schlägt die Norm einen Pauschalwert von 0,85 vor. Kennwerte für die Lichttransmission $\tau_{\text{D65,SNA}}$ werden aus Tab. 11 der entsprechenden Norm entnommen.²⁷ Dabei erfolgt die Auswahl in erster Priorität auf Basis des Verglasungstyps, in zweiter Priorität auf Basis des U-Wertes der Verglasung und in dritter Priorität auf Basis des Gesamtenergiedurchlassgrads *glass_solar_transmittance*. Der Lichttransmissionsgrad für die gesamten Fensterflächen am Gebäude ergibt sich als flächengewichtetes Mittel.

- *u_walls*: Wärmedurchgangskoeffizient der Außenwände

Aus dem Datensatz der Tiefenerhebung ist das Material der Außenwand („massiv“, „Holz“, „2-schaliges Mauerwerk“, „Plattenbau“ und „Sandwich-Panel“, „vorgehängte Platten“, „Wand gegen Erdreich“) bekannt. Ferner sind die Dämmstärke und der gedämmte Anteil der Außenwand verzeichnet. In Anlehnung an Thiel und Riedel (2011) werden auf Basis der Außenwandkonstruktion und der Baualtersklasse die entsprechenden Pauschalwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten für nicht nachträglich gedämmte Außenwände entnommen.²⁸ Sofern eine Außenwand eine Dämmung aufweist, wird der Wärmedurchgangskoeffizient über folgende Umrechnungsformel korrigiert:²⁹

$$U_d = \frac{1}{\frac{1}{U_0} + \frac{d_D}{\lambda}} \quad (3.5)$$

²³ Vgl. DIN V 18599-2:2018-09, S. 39.

²⁴ Vgl. DIN V 18599-2:2018-09, S. 37.

²⁵ Vgl. DIN V 18599-4:2018-09, S. 39.

²⁶ Vgl. Szokolay (1980), S. 188.

²⁷ Vgl. DIN V 18599-2:2018-09, S. 40.

²⁸ Vgl. Thiel und Riedel (2011), S. 8.

²⁹ Vgl. BMWi und BMU (2015), S. 13.

Mit:

U_0 : Wärmedurchgangskoeffizient aus Thiel und Riedel (2011) [in W/(m²K)]

d_D : Mittlere Dämmstärke aus Tiefenerhebung [in m]

λ : Wärmeleitfähigkeit der Dämmung [in W/(mK)]

Unter Berücksichtigung des gedämmten Anteils s ergibt sich der Wärmedurchgangskoeffizient für die Außenwand:

$$U_{AW} = U_0(1 - s) + s \cdot \frac{1}{\frac{1}{U_0} + \frac{d_D}{\lambda}} \quad (3.6)$$

Da keine Informationen über das Material der Außenwanddämmung vorhanden sind, wird $\lambda = 0,04$ angesetzt.³⁰

- $u_windows$: Wärmedurchgangskoeffizient der Fenster
Für jede Orientierung werden dem Datensatz die Rahmenart der Fenster („Holz“, „Kunststoff“, „Alu/Stahl“, „Passivhausqualität“) sowie die Information, ob die Fenster vor oder nach 1995 eingebaut wurden, entnommen. Für jede Orientierung werden die baualterstypischen U-Werte für Fensterrahmen nach Hörner und Knissel (2014) verwendet.³¹ Der U-Wert für das Fenster berechnet sich anteilig nach:³²

$$U_{Fen} = U_{Glas} \cdot f_{Glas} + U_{Rahmen} \cdot (1 - f_{Glas}) \quad (3.7)$$

Mit:

U_{Rahmen} : Wärmedurchgangskoeffizient Fensterrahmen [in W/(m²K)]

U_{Glas} : Wärmedurchgangskoeffizient Verglasung [in W/(m²K)]

f_{Glas} : Verglasungsanteil der Fenster [Pauschalwert von 0,7 nach]³³

Die U-Werte der Fenster für jede Himmelsrichtung werden anschließend durch flächengewichtete Mittelung zu einem U-Wert zusammengefasst.

- u_roof : Wärmedurchgangskoeffizient Dach
Aus dem Datensatz der Tiefenerhebung ist das Material der Kellerdecke bzw. des Fußbodens („massiv“, „Holz“, „Sandwich-Panel“) bekannt. Die Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten für das Dach folgt der gleichen Methodik wie bei der Ermittlung des U-Wertes der Außenwand, d. h. Bestimmung der Wärmedurchgangskoeffizienten nicht nachträglich gedämmter Dächer in Anlehnung an Thiel und Riedel (2011) und anschließende Korrektur mittels Gl. (3.6) über die Dämmstärke und den gedämmten Anteil des Daches. Die Wärmeleitfähigkeit der Dachdämmung wird erneut mit 0,04 angesetzt.
- u_base : Wärmedurchgangskoeffizient des unteren Gebäudeabschlusses
Aus dem Datensatz der Tiefenerhebung ist das Material der Kellerdecke resp. des Fußbodens

³⁰ Vgl. Institut Wohnen und Umwelt (2020a), Tabellenblatt 33_Präprozessor.

³¹ Vgl. Hörner und Knissel (2014), S. 7.

³² Vgl. Institut Wohnen und Umwelt (2020a), Tabellenblatt 33_Präprozessor.

(„massiv“, „Holz“, „Decke gegen Tiefgarage“) bekannt. Die Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten des unteren Gebäudeabschlusses folgt der gleichen Methodik wie bei der Ermittlung des U-Wertes der Außenwand, d. h. Bestimmung der Wärmedurchgangskoeffizienten nicht nachträglich gedämmter Dächer in Anlehnung an Thiel und Riedel (2011) und anschließende Korrektur mittels Gl. (3.6) über die Dämmstärke und den gedämmten Anteil. Die Wärmeleitfähigkeit der Dämmung wird erneut mit 0,04 angesetzt.

- *temp_adj_base*: Temperaturanpassungskoeffizient des unteren Gebäudeabschlusses

Im Rahmen der Berechnung des Transmissionswärmetransferkoeffizienten für die Wärmetransmission an das Erdreich muss gem. DIN EN ISO 13790:2008-09 ein Anpassungsfaktor mit dem Wert $b_{tr,x} \neq 1$ berücksichtigt werden, sofern „die Temperatur auf der anderen Seite des Bauteils nicht gleich der Temperatur der Außenumgebung ist [...]“.³⁴ Dies ist bspw. bei den an das Erdreich angrenzenden Bauteilen wie dem unteren Gebäudeabschluss und den unterirdischen Außenwänden der Fall. Der vom Gebäudeinnenraum abfließende Wärmestrom erfährt eine Dämpfung, die im Wesentlichen durch den dämmenden und speichernden Effekt des umgebenden Erdreichs beeinflusst wird.³⁵ Um diese zeitlichen Verzögerungen zu berücksichtigen, verweist die DIN EN ISO 13790:2008-09 auf ein monatliches Verfahren aus der ISO 13789.³⁶ In Abschnitt 7.4 der Norm wird auf die ISO 13370 weiterverwiesen, sofern für die Berechnung des Energiebedarfs ein stündliches Verfahren gewählt wird.³⁷ Gem. DIN EN ISO 13370:2018-03 wäre das Verfahren aus Anhang C.2 zur Berechnung des monatlichen Wärmestroms geeignet.³⁸ Hierfür sind Größen notwendig, die weder in der Tieferenerhebung noch in der Breiterehebung vorhanden sind. Dies betrifft bspw. die Gesamtdicke der Außenwände (Vgl. ISO 13370 Gl. (H.2), (H.3) i.V.m. Gl. (3), (12) zur Berechnung der wirksamen Gesamtdicke).³⁹ Ferner wären sinnvolle Annahmen über das Monatsmittel der Innentemperaturen zu treffen, die zur Berechnung notwendig sind. Zur vereinfachten Abschätzung des Temperaturanpassungskoeffizienten wird daher auf die Vorschriften der DIN V 4108-6:2003-06 zurückgegriffen, nach der (in Abweichung zur DIN EN ISO 13790:2008-09) ein einziger Korrekturfaktor in Abhängigkeit des Bauteils bestimmt wird.⁴⁰ Dieser Temperatur-Korrekturfaktor F_x entspricht dem b -Wert nach DIN EN ISO 13789.⁴¹ Nach Tab. 3 der DIN V 4108-6:2003-06 ist für den unteren Gebäudeabschluss eine Fallunterscheidung vorzunehmen, nach der die Stelle der oberen Kante des Erdreichs entscheidend für die Wahl des Pauschalwertes ist. Neben einer aufgeständerten Bodenplatte (Bodenplatte liegt über der Erdreich-Oberkante), die an dieser Stelle nicht berücksichtigt wird, kann zwischen einem unterkellerten Gebäude (die Bodenplatte befindet sich unterhalb der Erdreich-Oberkante) und einem nicht unterkellerten Gebäude (die Bodenplatte befindet sich direkt auf der Erdreich-Oberkante) unterschieden werden. Ferner kann ein Kellergeschoss beheizt oder teilbeheizt sein. Für jeden der in der

³⁴ DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 44.

³⁵ Vgl. Lipovcic et al. (2019), S. 104.

³⁶ DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 44.

³⁷ Vgl. DIN EN ISO 13789:2018-04, S. 24.

³⁸ Vgl. DIN EN ISO 13370:2018-03, S. 41.

³⁹ Vgl. DIN EN ISO 13370:2018-03.

⁴⁰ Vgl. DIN V 4108-6:2003-06, S. 22-24.

⁴¹ Vgl. DIN V 4108-6:2003-06, S. 24.

Norm genannten Fälle richtet sich die Wahl des Temperatur-Korrekturfaktors nach dem charakteristischen Bodenplattenmaß B'^{42} und dem Wärmedurchlasswiderstand der Bodenplatte/Kellerdecke R_f .⁴³ Für die Berechnung der Bodenplattenfläche A_G wird die maximale Fassadenlänge Nord/Süd mit der maximalen Fassadenlänge Ost/West multipliziert. Der Wärmedurchlasswiderstand ergibt sich als Kehrwert des Wärmedurchgangskoeffizienten.⁴⁴ Aus den Daten der Tiefenerhebung ist die mittlere Anzahl der unterirdischen Vollgeschosse sowie die Anzahl der beheizten unterirdischen Vollgeschosse bekannt. Im Einzelnen ergeben sich an den Gebäudesituationen folgende Möglichkeiten: Wenn das Gebäude keinen Keller hat, ist der unterer Gebäudeabschluss die Bodenplatte bzw. der Fußboden auf dem Erdreich (Fall 12, konservative Annahme ohne Perimeterdämmung). Wenn das Gebäude einen Keller hat, der nicht beheizt ist, ist der unterer Gebäudeabschluss die Kellerdecke zum unbeheizten Keller (Fall 16, konservative Annahme ohne Perimeterdämmung). Wenn das Gebäude einen Keller hat, der vollständig beheizt ist, ist der unterer Gebäudeabschluss der Fußboden des beheizten Kellers (Fall 10) oder das Gebäude hat einen teilbeheizten Keller. Im letzteren Fall findet ein Wärmefluss von der Kellerdecke in den unbeheizten Kellerraum und ein Wärmefluss vom beheizten Kellerraum über die Bodenplatte in das Erdreich statt. Diese Situation wird behandelt, als sei der Keller vollbeheizt und damit die Fußbodenfläche des beheizten Kellers (Fall 10) als Bauteil des unteren Gebäudeabschlusses herangezogen.

- *temp_adj_walls Ug*: Temperaturanpassungskoeffizient für unterirdische Außenwandflächen
Für die Berechnung des Temperaturanpassungskoeffizient der unterirdischen Außenwandflächen wird ebenfalls Tab. 3 der DIN V 4108-6:2003-06 herangezogen. Sofern in einem Gebäude die Anzahl der beheizten unterirdischen Vollgeschosse null übersteigt, wird Fall 11 (Wand des beheizten Kellers) verwendet und der entsprechende Temperatur-Korrekturfaktor unter Berücksichtigung von B' und dem Wärmedurchlasswiderstand der Außenwand R_w entnommen.⁴⁵
- *ach_vent / ach_win / ach_infl*: Luftwechselrate durch Belüftungsanlage/
Fensterlüftung/Infiltration

Aus den Daten der Tiefenerhebung wird zunächst der Luftwechsel durch Infiltration bestimmt. Hierfür werden dem Datensatz Angaben zur Luftdichtheit des Gebäudes (unterteilt in „Passivhausanforderung erfüllt“, „Neubau mit Dichtheitstest und raumluftechnische Anlage“, „Neubau mit Dichtheitstest ohne raumluftechnische Anlage“, „Neubau ohne Dichtheitstest“, „Bestehendes Gebäude ohne Dichtheitstest“, „Bestehendes Gebäude mit offensichtlichen Undichtheiten“) entnommen. Für die einzelnen Dichtheitsklassen sind im TEK-Tool basierend auf der DIN V 18599-2:2018-09, Tab. 7 und des Passivhaus Institut (2016), Tab. 1 verschiedene n_{50} -Werte definiert.⁴⁶ Aus diesen, auf einem 50 Pa Druckunterschied zur Umgebung beruhenden

⁴² $B' = A_G/0,5P$ (mit A_G : Fläche der Bodenplatte in m^2 ; P : (exponierter) Umfang der Bodenplatte in m) (Vgl. DIN V 4108-6:2003-06, S. 24)

⁴³ Vgl. DIN V 4108-6:2003-06, S. 23-24.

⁴⁴ Vgl. Fischer et al. (2008), S. 127.

⁴⁵ Vgl. DIN V 4108-6:2003-06, S. 23.

⁴⁶ Vgl. Institut Wohnen und Umwelt (2020a).

den, n_{50} -Werten kann der Infiltrationsvolumenstrom abgeschätzt werden.⁴⁷ Die Beziehung zwischen n_{50} und n_{inf} gem. DIN V 18599-2:2018-09 beruht nach Hörner und Knissel (2014) vermutlich auf den Erkenntnissen bei Wohngebäuden (insbesondere Einfamilienhäusern). Mit der Größe des Gebäudes sinkt das AV-Verhältnis⁴⁸, sodass die angegebenen n_{50} -Werte für große Gebäude mit kleinen AV-Verhältnissen tendenziell zu hoch angesetzt sind und in der Folge für diese Gebäude die Heizenergiebedarfe potenziell überschätzt werden. Durch die nachfolgende Korrektur wird der Einfluss des AV-Verhältnisses angepasst:⁴⁹

$$n_{50,korr} = n_{50} \cdot \frac{AV_{\text{Gebäude}}}{AV_{\text{Standard}}} \quad (3.8)$$

Mit:

n_{50} : Luftwechsel bei einer Druckdifferenz von 50 Pa zwischen Gebäudeinnen- und -außenseite [in 1/h]

AV_{Standard} : Standard-AV-Verhältnis [Pauschalwert von 0,9 m²/m³]

$AV_{\text{Gebäude}}$: AV-Verhältnis des Gebäudes [in m²/m³]

$$\frac{(Fassadenflächen + Dachfläche + Fläche unterer Gebäudabschl.)}{Fläche unterer Gebäudabschl. \cdot mittlere Gebäudehöhe}$$

Die Bestimmung des Infiltrationsluftwechsels ergibt sich zu:⁵⁰

$$n_{inf} = n_{50,korr} \cdot e \cdot f_{ATD} \quad (3.9)$$

Mit:

e : Volumenstromkoeffizient resp. Abschirmungskoeffizient
[Standardwert: $e = 0,07$]

f_{ATD} : Faktor zur Berücksichtigung von Außenluftdurchlässen
[ohne Außenluftdurchlässe: $f_{ATD} = 1$]

Für die Berechnungen von n_{inf} wird mit dem Standardwert für e gerechnet und angenommen, dass keine Außenluftdurchlässe an den Gebäuden vorhanden sind. An dieser Stelle sei angemerkt, dass der Infiltrationsluftwechsel für alle Gebäude nach Gl. (3.9) berechnet wird.⁵¹ Diese Gleichung gilt zur Berechnung des Infiltrationsluftwechsels für Gebäuden ohne mechanische Lüftung. Sofern im Gebäude eine mechanische Lüftung vorhanden ist, gilt Gl. (65) der Norm, die einen „[...] Faktor zur Bewertung der durch die mechanische Lüftungsanlage vermehrten oder verminderten Infiltration[...]“ berücksichtigt.⁵² Dieser Faktor f_e beträgt für mechanische Lüftungsanlagen, die dieselbe Zu- und Abluftmenge verarbeiten und folglich kein Über- oder Unterdruck im Raum entstehen lassen, eins, wodurch sich Gl. (65) wieder zu Gl. (64) bzw.

⁴⁷ Vgl. DIN V 18599-2:2018-09, S. 57 f.

⁴⁸ Das AV-Verhältnis entspricht dem Verhältnis der thermische Hüllfläche des Gebäudes zum beheizten Bruttogebäudevolumen

⁴⁹ Vgl. Hörner und Knissel (2014), S. 13.

⁵⁰ Vgl. DIN V 18599-2:2018-09, S. 57.

⁵¹ Vgl. DIN V 18599-2:2018-09, S. 58.

⁵² DIN V 18599-2:2018-09, S. 58.

Gl. (3.9) vereinfacht.⁵³ Für alle anderen mechanischen Lüftungsanlagen gilt unter Einbezug von individuellen Zu- und Abluftwechseln Gl. (70).⁵⁴ Dies wird hier nicht berücksichtigt bzw. es wird angenommen, dass das Gebäude entweder über keine RLT-Anlage oder über eine Lüftungsanlagen mit balancierter Zu- und Abluft verfügt.

Für jedes Nutzungsprofil der DIN V 18599-10:2018-09 ist u. a. der flächenbezogene Mindestluftvolumenstrom \dot{V}_A [in $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$] ausgewiesen. Dieser Mindestaußenluftvolumenstrom soll die Luftzufuhr einer aus hygienischen Aspekten mindestens notwendigen Sauerstoffmenge garantieren und damit die Qualität der Atemluft für die Gebäudenutzer sicherstellen.⁵⁵ Für die Umrechnung der Luftvolumenströme in Luftwechselraten werden die flächenbezogenen Mindestluftvolumenströme mit ihrem Kehrwert multipliziert. Der Mindestaußenluftwechsel n_{min} in 1/h ergibt sich damit zu:

$$n_{min} = \dot{V}_A \cdot \frac{\text{Nettoraumfläche}}{\text{Nettoraumfläche} \cdot (\text{Gebäudehöhe}/\text{Stockwerksanzahl})} \quad (3.10)$$

Sofern ein Gebäude über eine RLT-Anlage verfügt und bei der Vor-Ort-Begehung die Nennvolumenströme (in m^3/h) der Zu- und Abluft in den einzelnen Zonen festgestellt werden konnten, sind diese im Datensatz der Tiefenerhebung hinterlegt. Aus den Zuluft-Nennvolumenströme der einzelnen Zonen wird der Mittelwert bestimmt. Anschließend wird dieser über das Gebäudevolumen (abgeschätzt aus der Fläche des unteren Gebäudeabschlusses und mittlerer Gebäudehöhe) in eine Luftwechselrate der Dimension 1/h umgerechnet. Zur weiteren Bestimmung der individuellen Luftwechselraten durch RLT-Anlage und in Folge der Fensterlüftung wird folgende Fallunterscheidung vorgenommen:

- $n_{min} > n_{inf}$ und Anzahl der RLT = 0:
Um den Mindestluftwechsel sicherzustellen, wird die Differenz aus $n_{min} - n_{inf}$ von den Gebäudeinsassen über die Fensterlüftung n_{win} gedeckt.
- $n_{min} > n_{inf}$ und Anzahl der RLT > 0 und Angaben zum Volumenstrom:
Es wird angenommen, dass der Mindestluftwechsel durch die RLT gedeckt wird. Falls der angegebene Volumenstrom nicht ausreicht, um den Mindestluftwechsel zu gewährleisten, wird der Rest durch die Fensterlüftung gedeckt.
- $n_{min} > n_{inf}$ und Anzahl der RLT > 0 und keine Angaben zum Volumenstrom:
Es wird angenommen, dass der Mindestluftwechsel durch die RLT-Anlage vollumfänglich gedeckt werden kann.
- $n_{min} < n_{inf}$ und Anzahl der RLT = 0:
Der Infiltrationsluftwechsel übersteigt den Mindestluftwechsel. Da die Gebäudenutzer keinen Einfluss auf den Infiltrationsluftwechsel haben, wird im vorliegenden Fall der berechnete Infiltrationsluftwechsel herangezogen und $n_{win}, n_{vent} = 0$ gesetzt.

⁵³ DIN V 18599-2:2018-09, S. 58.

⁵⁴ DIN V 18599-2:2018-09, S. 60.

⁵⁵ Vgl. DIN V 18599-10:2018-09, S. 20.

- $n_{min} < n_{inf}$ und Anzahl der RLT > 0 und Angaben zum Volumenstrom:
Der Infiltrationsluftwechsel übersteigt den Mindestluftwechsel. Da reale Daten zum Volumenstrom der RLT-Anlage vorhanden sind, werden diese verwendet. Eine Fensterlüftung findet nicht statt, $n_{win} = 0$
- $n_{min} < n_{inf}$ und Anzahl der RLT > 0 und keine Angaben zum Volumenstrom:
Wenn der Infiltrationsluftwechsel den Mindestluftwechsel übersteigt und keine Angaben zum Volumenstrom vorhanden sind, gilt $n_{vent}, n_{win} = 0$
- *heat_recovery_efficiency*: Effizienz der Wärmerückgewinnungseinheit der Belüftung
Sofern es in einer Zone eine RLT-Anlage gibt und diese über eine Wärmerückgewinnungseinheit verfügt, ist im Datensatz der Tiefenerhebung der Typ und die Effizienz der Einheit vermerkt. Für die über eine RLT-Anlage mit Wärmerückgewinnungseinheit verfügenden Gebäude wird der Mittelwert der Wärmerückgewinnungseinheiten über alle Zonen bestimmt und für das Gebäude angesetzt. Verfügt ein Gebäude über eine RLT-Anlage mit Wärmerückgewinnungseinheit, bei der im Rahmen der Vor-Ort-Untersuchung aber kein Effizienzgrad festgestellt werden konnte, wird für diese Einheiten der Mittelwert aller in der Tiefenerhebung untersuchten Wärmerückgewinnungseinheiten angesetzt (= 0,7).
- *night_flushing_flow*: Luftwechselrate bei aktivierter Nachtlüftung
Im Rahmen der Tiefenerhebung wurden keine Angaben zur Nachtlüftung aufgenommen, daher wird sie an dieser Stelle nicht berücksichtigt.
- *thermal_capacitance*: Innere Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes
Im Datensatz der Tiefenerhebung ist für jedes Gebäude die Bauschwere des Gebäudes — unterteilt in „leicht“, „mittelschwer“, und „schwer“ — verzeichnet. Nach dieser Einteilung erfolgt die Bestimmung der innere Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes basierend auf den Kennwerten der DIN EN ISO 13790:2008-09 gem. Tab. B.1 in Anhang B.⁵⁶
- *t_start*: Ausgangstemperatur der Simulation
Aus dem Datensatz der Tiefenerhebung sind für jede Gebäudezone die mittlere Soll- bzw. Ist-Temperaturen im Heizfall bekannt. Das flächengewichtete Mittel dieser Temperaturen dient als Ausgangstemperatur für die Simulation der Tiefenerhebungsgebäude, wobei nur diejenigen Zonenflächen bei der Berechnung des Mittelwertes berücksichtigt werden, von denen es auch Angaben zur Temperatur gibt.
- *t_set_heating* und *t_set_cooling*: Solltemperatur der Heizung/Kühlung
Als Eingangsgrößen dienen die Raum-Solltemperatur Heizung/Kühlung auf Basis der Nutzungsprofile nach DIN V 18599-10:2018-09. Für die Gebäudetypen „Hallenbad“, „Spaß- und Freizeitbad“, „Thermalbad“ und „Hallenbad mit Freibadanlage“ werden die Solltemperaturen des Profils „Schwimmbad“ der SIA 2024:2015 verwendet, da es in der DIN V 18599-10:2018-09 für Schwimmbäder keine Nutzungsrandbedingungen gibt.

⁵⁶ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 81.

- *max_heating_energy_per_floor_area* und *max_cooling_energy_per_floor_area*: Maximale Heizlast/Kühllast

Neben der Art der Wärme- und Kälteerzeuger sind für die einzelnen Erzeugerarten auch die Nennleistungen im Datensatz der Tiefenerhebung vermerkt, sofern diese bei der Vor-Ort-Begehung festgestellt werden konnten. Da Gebäude häufig über mehrere Erzeuger verfügen, die eine oder mehrere Gebäudezonen versorgen, wird bei der Erstellung des Validierungsdatensatzes die Summe der einzelnen Nennleistungen sowohl für die Wärme- als auch für die Kälteerzeuger zur Bestimmung der maximalen Heiz-/Kühlleistung verwendet. Sofern keine Angaben zur Leistung vorhanden sind, wird davon ausgegangen, dass der entsprechend anfallende Bedarf durch den Wärme- bzw. Kälteerzeuger zu jeder Stunde gedeckt werden kann. In diesem Fall wird die maximale Heizlast/Kühllast auf +/- unendlich (inf) gesetzt.

- *heating_supply_system*: Art der Heizanlage

Aus der Tiefenerhebung ist die Art des Wärmeerzeugers bekannt. Erfasst wurden u. a. verschiedene Arten von Brennwert-, Niedertemperatur-, Konstanttemperatur-, und Feststoffkessel sowie Fernwärme, verschiedene Wärmepumpen und BHKWs. Ferner ist der verwendete Energieträger zur Wärmeerzeugung bekannt. Da im DIBS für jedes Gebäude nur ein Wärmeerzeuger abgebildet werden kann, werden aus dem Datensatz der Tiefenerhebung Angaben zur Erzeugerart, zum Energieträger des Wärmeerzeugers sowie zum Deckungsanteil (unterteilt in „gering (Spitzenlast)“, „mittel (Parallelbetrieb, Standard)“, „hoch (Grundlast)“, „fix (Grundlast) (nur KWK und WP)“ und „vollständig (Monovalent)“) entnommen. Daraus wird ein Wärmeerzeuger als Hauptwärmeerzeuger für das Gebäude bestimmt. Die Auswahl erfolgt in erster Priorität nach dem Deckungsanteil vollständig/hoch/mittel/fix/gering und bei Gleichheit des Deckungsanteils unterschiedlicher Wärmeerzeuger in zweiter Priorität nach der Leistung des Wärmeerzeugers. Erzeuger mit höherer Leistung werden bevorzugt. Die Kombination aus Erzeugerart und Energieträger bestimmt die Erzeugeraufwandszahl, die bei der Umsetzung im DIBS verwendet wird (Vgl. 2.2.7). Für die einzelnen Wärmeerzeuger wird auf Tab. C.2 in Anhang C verwiesen.

- *heating_emission_system*: Art der Wärmeübergabe

Die Art der Wärmeübergabe im DIBS unterscheidet sich danach, welchem Temperaturknoten der Wärmestrom zugeführt wird (Vgl. 2.2.7). Im Rahmen der Tiefenerhebung wird zwischen zehn verschiedenen Wärmeübergabesystemen unterschieden und für jede Zone ein Wärmeübergabesystem bestimmt. Die Zuordnung der einzelnen Wärmeübergabesysteme zum jeweiligen Temperaturknoten ist in Anhang D dieser Arbeit in Tab. D.1 dargestellt. Dabei wird das im Gebäude überwiegend vorherrschende Wärmeübergabesystem zugrunde gelegt.

- *cooling_supply_system*: Art der Kühlanlage

In der Tiefenerhebung wird zwischen verschiedenen Arten von Kompressionskältemaschinen und einer Absorptionskältemaschine unterschieden. Die Kompressionskältemaschinen unterscheiden sich nach ihrer Art der abgeführten Wärmeenergie (luftgekühlt/wassergekühlt) und ihrer Leistungsregelung (einstufig/mehrstufig). Ein Gebäude kann von mehreren Kälteerzeugern versorgt werden. Im Unterschied zu den Wärmeerzeugern geschieht dies meist durch

den gleichen Anlagentyp. Ist dies nicht der Fall, wird im Sinne einer konservativen Annahme die Kältemaschine mit dem schlechteren EER/EER+ ausgewählt. Bei einigen Gebäuden gibt es entweder nur Informationen zum Kälteerzeuger oder ausschließlich Informationen zum Kälteübergabesystem. Im letzteren Fall kann vermutet werden, dass es sich hierbei um eine dezentrale Kälteversorgung handelt. Da in beiden Fällen jedoch nicht ausgeschlossen werden kann, ob es sich nicht um Informationslücken handelt, werden diese Beobachtungen vom Validierungsdatensatz ausgeschlossen. Folglich werden ausschließlich Gebäude mit zentraler Kälteerzeugung und -versorgung berücksichtigt. Für die einzelnen Kälteerzeuger Vgl. Anhang C, Tab. C.3.

- *cooling_emission_system*: Art der Kälteübergabe

Im Rahmen der Tiefenerhebung wurde für jede Gebäudezone eines von elf möglichen Kälteübergabesystemen erfasst. Wie bei der Umsetzung der Wärmeübergabesysteme wird auch hier das im Gebäude überwiegend vorherrschende Übergabesystem für den Validierungsdatensatz berücksichtigt und einem der Temperaturknoten zugeordnet. Die Zuordnung der einzelnen Kälteübergabesysteme zum jeweiligen Knoten ist in Anhang D in Tab. D.2 dargestellt.

3.2 Gegenüberstellung des berechneten Bedarfs und des gemessenen Verbrauchs

Die Validierung des DIBS wird im Rahmen der BauSIM 2022 veröffentlicht werden und erst anschließend dieser Dokumentation hinzugefügt. Erste Auswertungen finden sich im DIBS-Repository: <https://github.com/IWUGERMANY/DIBS---Dynamic-ISO-Building-Simulator/wiki/Validation-based-on-ENOB:dataNWG-on-site-inspection-data>.

Kapitel 4

Zur Berechnung des Raumwärme- und -kältebedarfs des deutschen Nichtwohngebäudebestands

In der Breitenerhebung wurden 5.630 Nichtwohngebäude untersucht.¹ Hierfür wurden geeignete Ansprechpartner der jeweiligen Gebäude über verschiedene Aspekte der Gebäudesituation befragt. Dies betrifft typologische und strukturelle Merkmale wie bspw. Gebäudefunktion, Baualter oder Informationen über die Größe und Kompaktheit, aber ebenso bauliche und gebäudetechnische Merkmale wie bspw. Informationen zur Bauweise und der energetischen Beschaffenheit einzelner Bauteile, Art der Versorgungsanlagen sowie Informationen über die Belüftung, Klimatisierung und Beleuchtungseinrichtung.² Für die Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude werden aus den einzelnen Befragungsinhalten am IWU entsprechende Parameter abgeleitet und der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Einen vollständigen Aufschluss über die Befragung der Breitenerhebung liefert der Interviewfragebogen.³ Durch die Verlängerung der Projektlaufzeit bis zum 31.05.2021 stehen die plausibilisierten und aufbereiteten Daten der Breitenerhebung derzeit noch nicht zur Verfügung, um den Raumwärme- und -kältebedarf dieser Gebäude zu errechnen (Stand: 23.11.2020). Das nachfolgende Kapitel 4.1 dient der Vorstellung der Datenaufbereitung aus den Informationen der Breitenerhebung, wie sie für die Simulation mit dem DIBS vorliegen müssen, sodass dieser nach Veröffentlichung der Daten genutzt werden kann, um den Raumwärme- und -kältebedarf der rund 5.000 Gebäude zu errechnen. Im Unterschied zur Tieferhebung wurden einige Gebäudekennwerte im Rahmen der Breitenerhebung nicht oder in anderer Form erhoben als in der Tieferhebung. Z. B. erfolgte in der Breitenerhebung keine zonenweise Einteilung des Objekts und damit schwächer segmentierte Daten. Der errechnete Endenergiebedarf von einem der 456 Gebäuden der Tieferhebung führt mit den Daten der Breitenerhebung zu einem anderen Ergebnis. Das anschließende Kapitel ?? zeigt eine Möglichkeit auf, wie mithilfe einer Regressionsanalyse die Verbrauchskennwerte der Tieferhebung genutzt werden können, um die mit den aus der Breitenerhebung errechneten Bedarfe an den Verbrauch zu schätzen. Die abgeschätzten Verbrauchskennwerte der 5.630 Gebäude können genutzt werden, um diese über

¹ Vgl. Institut Wohnen und Umwelt (2020d).

² Vgl. IFAK (2016), S. 8 f.

³ Vgl. Institut Wohnen und Umwelt (2020e).

die stichprobenmethodische Konzeption des Projekts ENOB:dataNWG unter Ausweisung des statistischen Fehlers auf räumliche Aggregate hochzurechnen. Die hinter der Hochrechnung stehende Theorie wird in Kapitel ?? in seinen Grundzügen aufgezeigt.

4.1 Erzeugung der Eingangsparameter aus Daten der Breiterehebung

Bei der Generierung der einzelnen Eingangsparameter mittels der Daten der Breiterehebung wird, soweit möglich, die gleichen Vorgehensweisen wie bei der Datengenerierung aus der Tieferhebung verwendet. Abweichungen in den Methoden werden weitestgehend vermieden, sodass die folgenden Ausführungen komprimiert vorgestellt werden können. Dem Skript *annualSimulation.py* zur Simulation ist das Modul *dataPreprocessingBE.py* vorangestellt. Für die Erzeugung der Eingangsgrößen benötigt das Modul einen Datensatz mit ausgewählten Parametern der Breiterehebung. Ein beispielhafter Datensatz befindet sich in den elektronischen Anlagen dieser Arbeit.⁴ Ferner wird auf Standardgrößen der DIN V 18599-2:2018-09, 18599-4:2018-09 und 18599-10:2018-09 zurückgegriffen. Diese werden dem Modul in tabellarischer Form über *normData.xlsx* zur Verfügung gestellt.

Erzeugt werden die gleichen Eingangsparameter wie in Kapitel 3.1, folglich gilt die Parameterbeschreibung aus Tab. A.2, die im Anhang A dieser Arbeit dargestellt ist.

- *scr_gebauede_id* (Gebäude-ID), *plz* (Postleitzahl des Gebäudestandortes), *hk_geb* und *uk_geb* (Gebäudefunktion Hauptkategorie/Unterkategorie), *max_occupancy* (Maximale Anzahl der Personen im Gebäude)

Diese Informationen sind im Datensatz der Breiterehebung enthalten und können direkt in den Eingangsdatensatz überführt werden.

- *wall_area_og*: Summe der oberirdischen Außenwandflächen

Die Summe der oberirdischen Außenwandflächen gegen Außenluft wird im Datensatz der Breiterehebung als eigenes Merkmal ausgewiesen und kann daher unverändert in den Eingangsdatensatz übernommen werden. Wie bei der Erzeugung des Validierungsdatensatzes basieren die Flächen auf der Hüllflächenberechnung über die Geodaten des IÖR.⁵ Zur Ausweisung der Summe der Außenwandflächen gegen Außenluft wird diese im Rahmen des Projekts ENOB:dataNWG mit Informationen aus der Breiterehebung angereichert.

- *wall_area_ug*: Summe der unterirdischen Außenwandflächen

Die Summe der Außenwandfläche gegen das Erdreich des gesamten Gebäudes wird im Datensatz der Breiterehebung als eigenes Merkmal geführt.

⁴ Bei Parametern, die nicht numerische Ausprägungen enthalten, sind die einzelnen Ausprägungen im originalen Datensatz der Breiterehebung in Anlehnung an den Interview-Fragebogen codiert. Übersetzungen in den Klartext sind im Modul *dataPreprocessingBE.py* implementiert.

⁵ Vgl. Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (2020).

- *window_area_north*, *window_area_east*, *window_area_south*, *window_area_west*: Summe der Fensterflächen je Himmelsrichtung
Aus der Breitenerhebung ist der Fensterflächenanteil in Prozent der Fassadenfläche bekannt. Über die Fassadenfläche je Orientierung und dem Fensterflächenanteil wird für den Eingangsdatensatz die Fensterfläche für jede Orientierung berechnet.
- *net_room_area* (Netto-Raumfläche), *energy_ref_area* (Energiebezugsfläche)
Beide Parameter werden im Datensatz der Breitenerhebung als eigene Merkmale geführt. Die EBF wird im Projekt aus der Netto-Raumfläche und dem Anteil der thermisch konditionierten Fläche berechnet. Wenn das Gebäude nicht beheizt ist, wird im Datensatz der Breitenerhebung keine beheizte Fläche ausgewiesen, daher enthält die EBF an dieser Stelle die Ausprägung „-8“ für „trifft nicht zu“. In diesem Fall wird die Berechnung des Raumwärme- und -kältebedarfs in der Simulation übersprungen.⁶
- *net_room_area_base*: Fläche des unteren Gebäudeabschlusses
Die Fläche des unteren Gebäudeabschlusses für den Eingangsdatensatz wird wie in der Tiefenerhebung nach Gl. (3.1) berechnet. Die hierfür benötigte mittlere Anzahl der oberirdischen und unterirdischen Geschosse werden als Merkmal im Datensatz der Breitenerhebung geführt.
- *roof_area*: Dachfläche
Als Dachfläche wird die Fläche über einer beheizten Dachgeschossfläche angesetzt, die in der Breitenerhebung ausgewiesen wird.
- *building_height*: (mittlere) Gebäudehöhe
Die mittlere Gebäudehöhe ist als Merkmal im Datensatz der Breitenerhebung enthalten und basiert wie die Fassadenabwicklung auf der Geodatenanalyse des IÖR. Fehlende oder ungültige Werte werden, wenn möglich, vom IWU imputiert.
- *lighting_load*: elektrische Leistung der Beleuchtung
In der Breitenerhebung wurden die Teilnehmer nach der überwiegenden Beleuchtungsart („Direkt (Licht fällt direkt auf den Arbeitsbereich)“, „Indirekt (Licht, das von Decken und Wänden reflektiert wird)“, „Direkt/indirekt“) und nach der überwiegende Lampenart („Glüh- oder Halogenlampe“, „Leuchtstofflampe“, „LED (allgemein)“, „LED-Ersatzlampe“, „LED-Speziallampe“) bezogen auf die Nutzungsfläche des Gebäudes befragt.⁷ Wie in Kapitel 3.1 wird auch hier das Tabellenverfahren der DIN V 18599-4:2018-09 eingesetzt.⁸ Im Unterschied zur Tiefenerhebung werden in der Breitenerhebung die verschiedenen Ausprägungen der Lampenarten weniger fein untergliedert. Zur Bestimmung des Anpassungsfaktors k_L nach Tab. 6 werden die dort aufgeführten Lampenarten in Anlehnung an die abgefragten Arten der Breitenerhebung zu fünf Gruppen zusammengefasst und entsprechende Mittelwerte gebildet.⁹ Weitere für das Tabellenverfahren benötigte Größen werden nach der in Kapitel 3.1 vorgestellten Vorgehensweise generiert.

⁶ Eine Meldung mit der entsprechenden Gebäude-ID wird bei der Simulation in der Konsole ausgegeben.

⁷ Vgl. Institut Wohnen und Umwelt (2020e).

⁸ Vgl. DIN V 18599-4:2018-09, S. 24-28.

⁹ Vgl. DIN V 18599-4:2018-09, S. 27.

- *lighting_control*: Mindestbeleuchtungsstärke
Die Mindestbeleuchtungsstärke basiert wie beim Validierungsdatensatz auf den Wartungswerten der Beleuchtungsstärke der DIN V 18599-10:2018-09.¹⁰
- *lighting_utilisation_factor* (Lichtausnutzungsfaktor), *lighting_maintenance_factor* (Wartungsfaktor der Verglasung)
Zur Generierung des Lichtausnutzungsfaktors und dem Wartungsfaktor der Verglasung wird die gleiche Vorgehensweise wie in Kapitel 3.1 angewendet.
- *glass_solar_transmittance*: Energiedurchlassgrad der Verglasung
Aus dem Fragebogen der Breitenerhebung wird im Projekt ENOB:dataNWG die an der Fassade überwiegend angebrachte Verglasung abgeleitet und in „1-Scheiben-Glas“, „2-Scheiben-Glas“, „3-Scheiben-Glas“ und „Passivhaus-Fenster“ unterteilt.¹¹ Für den Eingangsdatensatz wird auf Basis dieser Verglasungstypen der Gesamtenergiedurchlassgrad nach DIN V 18599-2:2018-09, Tab. 8 bestimmt.¹² Nach den Qualitätsstandards für Passivhäuser werden als Passivhaus-Fenstern mindestens dreifach Wärmeschutzverglasungen eingesetzt.¹³ Dies entspricht dem Glastyp „Wärmedämmglas dreifach mit Argonfüllung und zwei Beschichtungen“ der DIN V 18599-10:2018-09, Tab. 8 und daher einem konservativ gewählten g-Wert von $g = 0,53$.¹⁴
- *glass_solar_shading_transmittance*: Energiedurchlassgrad der Verglasung bei aktiviertem Sonnenschutz
Aus der Breitenerhebung ist die überwiegende Art des Sonnenschutzes je Haupthimmelsrichtungen bekannt. Unterteilt wird in die sechs Gruppen „Sonnenschutzverglasung“, „außenliegende variable Sonnenschutzvorrichtung (z. B. Lamellen-Raffstoren)“, „außenliegende feststehende Sonnenschutzvorrichtung“, „in der Verglasung liegende Sonnenschutzvorrichtung“, „innenliegende Sonnenschutzvorrichtung“ oder „keine Sonnenschutzvorrichtung“.¹⁵ Die Einteilung steht nicht im Einklang mit den Standardwerten der DIN V 18599-2:2018-09, Tab. 8, für deren Anwendung Informationen über die genaue Art und Farbe der Sonnenschutzvorrichtung notwendig sind. Daher wird auf die Abminderungsfaktoren der DIN 4108-2:2013-02 zurückgegriffen. Dort sind Anhaltswerte in Abhängigkeit der Glaserzeugnisse („Sonnenschutzglas zweifach“, „2-Scheiben-Glas“, „3-Scheiben-Glas“) aufgeführt.¹⁶ Da sich die Abminderungsfaktoren nach Glaserzeugnis nur geringfügig unterscheiden und keine Anhaltswerte für „1-Scheiben-Glas“ angegeben sind, wird für die Klasse der „außenliegenden variablen Sonnenschutzvorrichtungen“ der Mittelwert ($F_c = 0,22$) aus „Jalousien und Raffstore“ (Zeile 3.2.1 und 3.2.2) verwendet. Für die Klasse „außenliegenden feststehenden Sonnenschutzvorrichtungen“ der Mittelwert ($F_c = 0,32$) aus „Fensterläden, Rollläden, 3/4 geschlossen“ (Zeile 3.1.1) und für die Klasse der „in der Verglasung liegende Sonnenschutzvorrichtung“ und „innenliegende Sonnenschutzvorrichtung“ der Mittelwert ($F_c = 0,78$) aus „innenliegend oder zwischen den Scheiben“ (Zeile 2.1 - 2.3).

¹⁰ Vgl. DIN V 18599-10:2018-09, S. 26-30.

¹¹ Vgl. Institut Wohnen und Umwelt (2020e).

¹² Vgl. DIN V 18599-2:2018-09, S. 75 f.

¹³ Vgl. Kaufmann et al. (2004), S. 54 f.

¹⁴ Vgl. DIN V 18599-2:2018-09, S. 75 f.

¹⁵ Vgl. Institut Wohnen und Umwelt (2020e).

¹⁶ Vgl. DIN 4108-2:2013-02, S. 25.

Für „Sonnenschutzverglasung“ und „Keine Sonnenschutzvorrichtung“ gilt $F_c = 1$.¹⁷ Diese Werte werden mit den entsprechenden Energiedurchlassgraden der Verglasung multipliziert, sodass sich der Energiedurchlassgrad bei aktivierter Sonnenschutzvorrichtung ergibt.¹⁸

- *glass_light_transmittance*: Lichttransmissionsgrad

Die Berechnung des Lichttransmissionsgrads folgt wie bei der Erstellung des Validierungsdatensatzes der Methodik der DIN V 18599-4:2018-09.¹⁹ Ohne Kenntnis über den Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung – aus der Breitenerhebung sind keine U-Werte der Verglasung vorhanden – lässt sich für Passivhaus-Fenster kein Wert für $\tau_{D65,SNA}$ bestimmen. Um $\tau_{D65,SNA}$ dennoch festzulegen, wird der Mittelwert über die dreifachen Wärmedämmgläser herangezogen.²⁰

- *u_walls* (Wärmedurchgangskoeffizient der Außenwände), *u_windows* (Wärmedurchgangskoeffizient der Fenster), *u_roof* (Wärmedurchgangskoeffizient Dach), *u_base* (Wärmedurchgangskoeffizient des unteren Gebäudeabschlusses)

Die Wärmedurchgangskoeffizienten der einzelnen Bauteile werden als Merkmale in der Breitenerhebung ausgewiesen und können daher direkt in den Eingangsdatensatz überführt werden.

- *temp_adj_base* (Temperaturanpassungskoeffizient des unteren Gebäudeabschlusses), *temp_adj_walls Ug* (Temperaturanpassungskoeffizient für unterirdische Außenwandflächen)

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Temperaturanpassungskoeffizienten folgt der Methodik aus Kapitel 3.1. Da es in der Breitenerhebung keine Informationen gibt ob unterirdische Stockwerke beheizt sind, wird der konservativere Fall (unbeheizt, Fall 16) bei der Auswahl des Temperaturanpassungskoeffizienten gewählt.

- *ach_vent/ach_win/ach_infl*: Luftwechselrate durch Belüftungsanlage/Fensterlüftung/Infiltration

In der Breitenerhebung wurden die Teilnehmer befragt, ob es zentrale RLT-Anlage zur mechanischen Belüftung im Gebäude gibt, die sie mit „Nein, Fensterlüftung“, „Nein, nur dezentrale Anlage(n) vorhanden“, „Ja, zentrale Anlage(n) vorhanden“ oder „Weiß nicht“ beantworten konnten.²¹ Ferner wird im Rahmen der Breitenerhebung jedes Gebäude u. a. in eine von drei möglichen Baualtersklassen „Altbau bis einschließlich 1978“, „Bauten von 1979 - 2009“ und „Neubauten ab 2010“ eingestuft. Daran anknüpfend wird nach Gl. (3.8) der korrigierte $n_{50,korr}$ -Wert berechnet. Für die n_{50} -Bemessungswerte bei Standard AV-Verhältnis wird für die Baualtersklasse „Altbau bis einschließlich 1978“ der Bemessungswert für ein „Bestehendes Gebäude ohne Dichtheitstest“ ($n_{50} = 6 \text{ h}^{-1}$) verwendet. Für „Bauten von 1979 - 2009“ der Bemessungswert eines „Neubaus ohne Dichtheitstest“ ($n_{50} = 4 \text{ h}^{-1}$) und für die Gebäude der Klasse „Neubauten ab 2010“ der Bemessungswert für ein „Neubau mit Dichtheitstest“ ($n_{50} = 1 \text{ h}^{-1}$ bzw. 2 h^{-1} , je nachdem, ob das Gebäude über eine zentrale RLT-Anlage verfügt).²²

¹⁷ Vgl. DIN 4108-2:2013-02, S. 25.

¹⁸ Vgl. DIN 4108-2:2013-02, S. 24.

¹⁹ Vgl. DIN V 18599-2:2018-09, S. 39.

²⁰ Vgl. DIN V 18599-2:2018-09, S. 40.

²¹ Vgl. Institut Wohnen und Umwelt (2020e).

²² Vgl. DIN V 18599-2:2018-09, S. 59.

Der Luftwechsel durch Infiltration wird gem. Gl. (3.9) berechnet. Ausgehend von den Mindestaußenluftvolumenströmen der Nutzungsprofile der DIN V 18599-10:2018-09 wird über Gl. (3.10) der hygienische Mindestaußenluftwechsel im Gebäude bestimmt, der zu jeder Zeit gedeckt werden muss. Verfügt ein Gebäude über eine zentrale RLT-Anlage, wird angenommen, dass der Luftwechsel ausschließlich über diese gedeckt wird. Der Luftwechsel ergibt sich aus der Differenz des hygienische Mindestaußenluftwechsels und des Infiltrationsluftwechsels. Für die anderen drei Antwortmöglichkeiten wird davon ausgegangen, dass die Differenz aus hygienischem Mindestaußenluftwechsel und dem Luftwechsel durch Infiltration über die Fensterlüftung gedeckt wird. Übersteigt der Infiltrationsluftwechsel den Mindestluftwechsel bleibt der errechnete Infiltrationsluftwechsel beibehalten. Ist dies der Fall, werden die Luftwechsel durch die RLT-Anlage bzw. durch Fensterlüftung negativ. Um dies zu vermeiden, wird der entsprechende Luftwechsel pauschal auf $0,1 \text{ h}^{-1}$ in Anlehnung an DIN V 18599-2:2018-09 gesetzt.²³ Der verringerte Luftwechsel wirft u. U. die gleiche Problematik wie bei der Simulation der Tiefenerhebungsgebäude auf. Während der Gebäudenutzungszeiten findet in diesen Fällen kaum Luftaustausch statt und damit wird vermutlich auch der Raumwärmebedarf gering ausfallen.

- *heat_recovery_efficiency*: Effizienz der Wärmerückgewinnungseinheit der Belüftung
Für die Effizienz der Wärmerückgewinnungseinheit der RLT-Anlage sind aus der Breiterehebung keine Informationen bekannt. Daher wird der errechnete Mittelwert von 0,7 aus der Tiefenerhebung angesetzt.
- *night_flushing_flow*: Luftwechselrate bei aktivierter Nachtlüftung
In der Breiterehebung werden die Teilnehmer gefragt, ob das Gebäude, ggf. zusätzlich, durch sommerliche Nachtlüftung passiv oder durch freie Kühlung gekühlt wird.²⁴ Sofern dies der Fall ist, wird in der Simulation ein zusätzlicher Luftwechsel durch die Nachtlüftung angesetzt. Der Nachtluftwechsel wird mit $n = 2 \text{ h}^{-1}$ angenommen.²⁵
- *thermal_capacitance*: Innere Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes
In der Breiterehebung wird aus der Bauweise und der Baukonstruktion für jedes Gebäude ein Merkmal abgeleitet, das die Einschätzung der inneren Wärmespeicherfähigkeit in die Klassen „leicht“, „mittel“, „schwer“ gem. DIN EN ISO 13790:2008-09, Tab. 12 erlaubt (Vgl. Abb. B.1 im Anhang B).^{26,27} Die Zuweisungen, in Absprache mit dem IWU, sind Tab. D.3 in Anhang D zu entnehmen.
- *t_start* (Ausgangstemperatur der Simulation), *t_set_heating* und *t_set_cooling* (Solltemperatur der Heizung/Kühlung)
Wie in Kapitel 3.1 basieren die Solltemperaturen auf den Nutzungsprofilen der DIN V 18599-10:2018-09.²⁸ Für die Starttemperatur der Gebäudesimulation wird die Heiz-Solltemperatur

²³ Vgl. DIN V 18599-2:2018-09, S. 62.

²⁴ Vgl. Institut Wohnen und Umwelt (2020e).

²⁵ Vgl. DIN 4108-2:2013-02, S. 30.

²⁶ Vgl. Institut Wohnen und Umwelt (2020e).

²⁷ Vgl. DIN EN ISO 13790:2008-09, S. 81.

²⁸ Vgl. DIN V 18599-10:2018-09.

angesetzt.

- *max_heating_energy_per_floor_area* und *max_cooling_energy_per_floor_area*: Maximale Heizlast/Kühllast

Aus der Breitenerhebung sind keine Informationen über die Leistung der Erzeugungsanlagen bekannt, daher wird angenommen, dass der Bedarf durch den Wärme- bzw. Kälteerzeuger zu jeder Stunde gedeckt werden kann. Die Parameter werden auf +/- unendlich (inf) gesetzt.

- *heating_supply_system*: Art der Heizanlage

In der Breitenerhebung wird für jedes Gebäude ein Haupt-Wärmeerzeuger mit Energieträger ausgewiesen, zusammengesetzt aus der Kategorie des Wärmeerzeugers („zentral elektrisch“, „dezentral elektrisch“, „zentral Brennstoff“, „dezentral Brennstoff“, „Nah- oder Fernwärme“), der Art des Wärmeerzeugers sowie dem Energieträger. Da im DIBS keine Verteilungsverluste berücksichtigt werden, wird keine Unterscheidung zwischen zentral/dezentral vorgenommen. Jeder der 69 möglichen Merkmalsausprägungen aus der Breitenerhebung ist einer korrespondierende Klasse im DIBS zugewiesen. Die Zuweisungen sind Tab. D.4 im Anhang D zu entnehmen. Sofern ein Gebäude über keinen Wärmeerzeuger verfügt, enthält das Merkmal die Ausprägung „-8“. In diesem Fall wird die Berechnung des Raumwärme- und -kältebedarfs übersprungen und eine Meldung mit der entsprechenden Gebäude-ID in der Konsole ausgegeben.

- *heating_emission_system*: Art der Wärmeübergabe

In der Breitenerhebung ist die überwiegenden Art der Heizwärmeübergabe erfasst. Jede Ausprägung dieses Merkmals ist einem Temperaturknoten im DIBS zugeordnet, die Tab. D.5 im Anhang D entnommen werden kann.

- *cooling_supply_system*: Art der Kühlanlage

Aus der Breitenerhebung ist der Haupt-Kälteerzeuger im Gebäude bekannt. Die Merkmalsausprägung und die zugeordnete Kühlanlage im DIBS kann Tab. D.6 im Anhang D entnommen werden. Für Beobachtungen mit der Merkmalsausprägung „weiß nicht“ oder „trifft nicht zu“, wird für die Erzeugung des Eingangsdatensatzes davon ausgegangen, dass es im Gebäude keinen Kälteerzeuger gibt (und folglich auch kein Kälteübergabesystem).

- *cooling_emission_system*: Art der Kälteübergabe

Die Ausprägungen bei der überwiegenden Art der Kälteübergabe sind den Temperaturknoten im DIBS zugewiesen und können der Tab. D.7 im Anhang D entnommen werden.

Literatur

- ASHRAE (2016). Standard 90.1 User's Manual, ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2016, Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. URL: https://www.academia.edu/41993547/ASHRAE_Standard_90_1_Users_Manual.
- ASUE (2011). BHKW-Kenndaten 2011. URL: https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/blockheizkraftwerke/2011/broschueren/05_07_11_asue-bhkw-kenndaten-0311.pdf.
- BMWi und BMU (2015). Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Nichtwohngebäudebestand vom 7. April 2015.
- Bundesamt für Energie (2017). Kälte effizient erzeugen: Kurzfassung der SIA 382/1. URL: <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/8559>.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat (o. D.). *Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchswerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand*. URL: <https://www.bundesanzeiger.de/pub/publication/GZb2v1JQJe1XCpSyM6h?0>.
- Christoffer, J., Deutschländer, T. und Webs, M. (2004). *Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse TRY*. 1. Aufl. Offenbach am Main: Deutscher Wetterdienst. ISBN: 3-88148-398-5.
- COMNET (2010). Commercial Buildings Energy Modeling Guidelines and Procedures. RESNET Publication 2010-001. URL: http://www.floridabuilding.org/fbc/commission/FBC_1010/BERS/100816_COMNET_Modeling_Guidelines_and_Procedures.pdf.
- Crawley, D. B. und Barnaby, C. S. (2019). *Weather and Climate in Building Performance Simulation*. Hrsg. von J. Hensen und R. Lamberts. In: Building Performance Simulation for Design and Operation. 2. Aufl. Abingdon, New York: Routledge. ISBN: 978-1-138-39219-9.
- Crawley, D. B. und Lawrie, L. K. (2019). Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx). URL: <http://climate.onebuilding.org> (besucht am 25.05.2020).

- Deru, M., Field, K., Studer, D., Benne, K., Griffith, B., Torcellini, P., Liu, B., Halverson, M., Winiarski, D., Rosenberg, M., Yazdanian, M., Huang, J. und Crawley, D. (2011). U.S. Department of Energy Commercial Reference Building Models of the National Building Stock. Technical Report NREL/TP-5500-46861. URL: <http://www.nrel.gov/docs/fy11osti/46861.pdf>.
- Deutscher Wetterdienst (2017). Handbuch. Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. URL: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2013/testreferenzjahre/try-handbuch.pdf;jsessionid=32F96E889EBF9043C884BC440CF32493.live21301?__blob=publicationFile&v=1 (besucht am 16. 04. 2020).
- DIN 277-1:2016-01. Grundflächen und Rauminhalte im Bauwesen – Teil 1: Hochbau. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 4108-2:2013-02. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 13370:2018-03. Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Wärmetransfer über das Erdreich – Berechnungsverfahren (ISO 13370:2017). Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 13789:2018-04. Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Transmissions- und Lüftungswärmetransferkoeffizient – Berechnungsverfahren (ISO 13789:2017). Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 13790:2008-09. Energieeffizienz von Gebäuden - Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung (ISO 13790:2008). Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 15927-4:2005. Wärme und feuchtetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung und Darstellung von Klimadaten – Teil 4: Stündliche Daten zur Abschätzung des Jahresenergiebedarfs für Heiz- und Kühlsysteme (ISO 15927-4:2005). Berlin: Beuth Verlag.
- DIN V 18599-10:2018-09. Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN V 18599-2:2018-09. Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und

- Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN V 18599-4:2018-09. Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN V 4108-6:2003-06. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN V 4701-10:2003-08. Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung. Berlin: Beuth Verlag.
- DOE (2020). EnergyPlus Version 9.4.0 Documentation. Auxiliary Programs. URL: https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.4.0/AuxiliaryPrograms.pdf (besucht am 30.04.2020).
- DOE (o. J.). EnergyPlus: Weather Data for Simulation. URL: <https://energyplus.net/weather/simulation> (besucht am 30.04.2020).
- Dong, B., Yan, D., Li, Z., Jin, Y., Feng, X. und Fontenot, H. (2018). Modeling Occupancy and Behavior for Better Building Design and Operation - A Critical Review. In: *Building Simulation* 11 (5), S. 899–921. DOI: 10.1007/s12273-018-0452-x.
- Fischer, H.-M., Freymuth, H., Häupl, P., Homann, M., Jenisch, R., Richter, E. und Stohrer, M. (2008). *Lehrbuch der Bauphysik: Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima*. 6. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner. ISBN: 978-3-519-55014-3.
- Fitzner, K. und Finke, U. (2012). Lüftungsregeln für freie Lüftung: Projekt F 2072. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. URL: https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Berichte/F2072.pdf?__blob=publicationFile&.
- Fonseca, J., Thomas, D., Hsieh, S., Sreepathi, B. K., Mok, R., Mosteiro-Romero, M., Happle, G., Rogenhofer, L., Jack-Hawthorne, Khayatian, F., Shi, Z., Riegelbauer, E., Ong, B. L., Orenkiwi, Thanh, H., Paulneitzel, Sulzer, M., Elesawy, A., Acosta, J. A. B., AlexJew, VMarty, Bosova, A., Prakharmehta95 und Strusoftsawen (2020). Architecture-Building-Systems/CityEnergyAnalyst: CityEnergyAnalyst v3.10.0. URL: <https://github.com/architecture-building-systems/CityEnergyAnalyst> (besucht am 22.08.2020).

- Franzen, S. (2019). Postal Codes in JSON, XML and CSV Format. URL: <https://github.com/zauberware/postal-codes-json-xml-csv/> (besucht am 21.05.2020).
- Frey, H. (2019). *Energieautarke Gebäude: Auf dem Weg zu Smart Energy Systems*. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-57874-2.
- GEG2020 (2020). Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze: Vom 8. August 2020. In: *Bundesanzeiger 2020* (Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 37), S. 1728–1794. URL: https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/text.xav?SID=&tf=xaver.component.Text__0&toctf=&qmf=&hlf=xaver.component.Hitlist__0&bk=bgbl&start=%5C%2F%5C%2F*%5C%5B%5C%40node__id%5C%3D%5C%27941169%5C%27%5C%5D&skin=pdf&tlevel=-2&nohist=1&sinst=6C6E28BB.
- Hannoschöck, N. (2018). *Wärmeleitung und -transport: Grundlagen der Wärme- und Stoffübertragung*. 1. Aufl. Berlin: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-57571-0.
- Hörner, M. und Knissel, J. (2014). *Teilenergiekennwerte von Nichtwohngebäuden (TEK): Berechnungsgrundlagen des TEK-Tools Version TEK 6.2*. Darmstadt: IWU. ISBN: 978-3-941140-36-3.
- Hörner, M., Knissel, J. und Großklos, M. (2012). Versicherungsfragen bei Wärmeabfuhr durch sommerliche Nachtlüftung. In: *Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser. Sommerverhalten von Nichtwohngebäuden im Passivhausstandard Protokollband Nr. 41*.
- IFAK (2016). ENOB:dataNWG Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude. Bericht E1.2, Konzept Breitenerhebung. URL: https://www.datanwg.de/fileadmin/user/iwu/160823_IFAK_E-1-2_Konzept-Breitenerhebung.pdf (besucht am 15.07.2020).
- Institut Wohnen und Umwelt (2020a). *TEK-Tool*. Version 9.24. Darmstadt.
- Institut Wohnen und Umwelt (2020b). ENOB:dataNWG Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude. Tieferenerhebung. URL: <https://datanwg.de/stichprobenerhebung/tieferenerhebung/> (besucht am 02.04.2020).
- Institut Wohnen und Umwelt (2020c). *Variablendokumentation Tieferenerhebung, Bedarfserfassung*. Darmstadt.
- Institut Wohnen und Umwelt (2020d). ENOB:dataNWG Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude. Breitenerhebung. URL: <https://www.datanwg.de/stichprobenerhebung/breitenerhebung/> (besucht am 02.04.2020).

- Institut Wohnen und Umwelt (2020e). ENOB:dataNWG Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude. Fragebogen Breitenerhebung (Version 16). URL: https://www.datanwg.de/fileadmin/user/iwu/IWU_NWG_Fragebogen_20200417_Version16.pdf.
- Jakobiak, R. A. (2005). Tageslichtnutzung in Gebäuden. In: *BINE-Themeninfo* (1/2005), S. 1–12. ISSN: 1610-8302.
- Jayathissa, P. (2020). 5R1C Building Simulation Model. URL: https://github.com/architecture-building-systems/RC_BuildingSimulator (besucht am 22.03.2020).
- Jayathissa, P., Luzzatto, M., Schmidli, J., Hofer, J., Nagy, Z. und Schlueter, A. (2017). Optimising Building Net Energy Demand with Dynamic BIPV Shading. In: *Applied Energy* 202, S. 726–735. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.05.083.
- Kaufmann, B., Feist, W., Pfluger, R., John, M. und Nagel, M. (2004). *Passivhäuser erfolgreich planen und bauen. Ein Leitfaden zur Qualitätssicherung. Fachbuch F12*. Hrsg. von Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung und Bauwesen des Landes Nordrhein-Westfalen. URL: https://passiv.de/downloads/05_F12_passivhaeuser_erfolgreich_bauen.PDF.
- Laasch, T. und Laasch, E. (2013). *Haustechnik: Grundlagen - Planung - Ausführung*. 13. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-8348-9900-2.
- Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (2020). Projektinformation Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude. Berechnung der Hüllflächen aller Gebäude in der Stichprobe. URL: https://www.datanwg.de/fileadmin/user/iwu/201110_IOER_Projektinfo_6_Huellflaechen_final.pdf (besucht am 14.09.2020).
- Leimer, H.-P. (2016). *Bauphysik: Deutsch / Englisch mit Wörterbuch*. In: Lehrbücher des Bauingenieurwesens. 1. Aufl. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-44359-4.
- Lipovcic, D., Hafellner, H. und Kautsch, P. (2019). Unterschiedliche Berechnungsverfahren für die Berechnung der Wärmeströme erdberührter Bauteile. In: *Bauphysik* 41 (2), S. 104–110. DOI: 10.1002/bapi.201900003.
- Maderspacher, J., Zweifel, G. und Moosberger, S. (2012). Vergleich eines deterministischen mit einem stochastischen Ansatz für die Personenbelegung in Nichtwohngebäuden. In: *Proceedings of BauSIM, Fourth German Austrian IBPSA Conference. Gebäudesimulation auf den Größenskalen Bauteil, Raum, Gebäude, Stadtquartier. Fourth German-Austrian IBPSA Conference*. Berlin, S. 92–97.

- Mahdavi, A. und Tahmasebi, F. (2019). *People in Building Performance Simulation*. Hrsg. von J. Hensen und R. Lamberts. In: *Building Performance Simulation for Design and Operation*. 2. Aufl. Abingdon, New York: Routledge. ISBN: 978-1-138-39219-9.
- Passivhaus Institut (2016). Kriterien für den Passivhaus-, EnerPHit und PHI-Energiesparhaus-Standard (Version 9f). URL: https://passiv.de/downloads/03_zertifizierungskriterien_gebaeude_de.pdf.
- Quaschnig, V. und Hanitsch, R. (1995). Shade Calculations in Photovoltaic Systems. In: *ISES Solar World Conference*. Harare (Zimbabwe).
- Ranft, F. und Frohn, B. (2004). *Natürliche Klimatisierung*. In: *BauPraxis*. Basel: Birkhäuser. ISBN: 978-3-7643-6939-2.
- Recknagel, H. und Sprenger, E. (2009). *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik: einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik*. Hrsg. von E.-R. Schramek. 74. Aufl. München: Oldenbourg Industrieverlag. ISBN: 978-3-8356-3134-2.
- Reinhart, C. (2019). *Daylight Performance Predictions*. Hrsg. von J. Hensen und R. Lamberts. In: *Building Performance Simulation for Design and Operation*. 2. Aufl. Abingdon, New York: Routledge. ISBN: 978-1-138-39219-9.
- SIA 2024:2015. Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik. Zürich: SIA.
- Spitler, J. D. (2019). *Thermal Load and Energy Performance Prediction*. Hrsg. von J. Hensen und R. Lamberts. In: *Building Performance Simulation for Design and Operation*. 2. Aufl. Abingdon, New York: Routledge. ISBN: 978-1-138-39219-9.
- Staffell, I., Brett, D., Brandon, N. und Hawkes, A. (2012). A Review of Domestic Heat Pumps. In: *Energy & Environmental Science* 5 (11), S. 9291–9306. DOI: 10.1039/C2EE22653G.
- Streicher, W. (2003). „Passive Sonnenenergienutzung“. In: *Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. Hrsg. von M. Kaltschmitt, A. Wiese und W. Streicher. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 115–136. ISBN: 978-3-662-07115-1. DOI: 10.1007/978-3-662-07115-1_3.
- Szokolay, S. V. (1980). *Environmental Science Handbook for Architects and Builders*. 1. Aufl. Lancaster: The Construction Press. ISBN: 978-0-86095-813-0.
- Szokolay, S. V. (2008). *Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design*. 2. Aufl. Amsterdam: Elsevier, Architectural Press. ISBN: 978-0-7506-8704-1.

- Thiel, D. und Riedel, D. (2011). *Typisierte Bauteilaufbauten - Präzisierung der Pauschalwerte für Wärmedurchgangskoeffizienten aus der Bekanntmachung der Regeln der Datenaufnahme im Nichtwohngebäudebestand: Endbericht*. In: Forschungsinitiative Zukunft Bau F. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. ISBN: 978-3-8167-8605-4.
- Van Treeck, C., Elixmann, R., Rudat, K., Hiller, S., Herkel, S. und Berger, M. (2016). *Gebäude. Technik. Digital: Building Information Modeling*. In: VDI-Buch. 1. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-52824-2.
- Viessmann (2011). Planungshandbuch Wärmepumpen. URL: https://www.viessmann.de/content/dam/vi-brands/DE/PDF/Planungshandbuch/ph-waermepumpen.pdf/_jcr_content/renditions/original.media_file.download_attachment.file/ph-waermepumpen.pdf.
- Wesselak, V., Schabbach, T., Fischer, J. und Link, T. (2017). *Handbuch Regenerative Energietechnik*. 3. Aufl. Berlin: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-53072-6.
- Wilcox, S. und Marion, W. (2008). Users Manual for TMY3 Data Sets. Technical Report NREL/TP-581-43156. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/43156.pdf>.

Anhang

Anhangsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abbildungen im Anhang | 59 |
| Tabellen im Anhang | 60 |
| A Dokumentationen der Eingangsparameter | 61 |
| B Ergänzungen zur DIN EN ISO 13790:2008-09 | 64 |
| C Ergänzungen zum DIBS | 66 |
| C.1 Standorte der eingebundenen Wetterstationen | 66 |
| C.2 Zuweisungen der Nutzungsprofile | 67 |
| C.3 Exemplarisches Geräteprofil Einzel-, Gruppenbüro | 72 |
| C.4 Anlagenklassen und Übergabesysteme im DIBS | 72 |
| C.5 Ablauf einer jährl. Simulation im DIBS | 74 |
| D Zuweisungen bei der Simulation mit Daten der Tiefen-/Breitenerhebung | 75 |
| D.1 Zuweisungen bei der Simulation anhand der Tiefenerhebung | 75 |
| D.2 Zuweisungen bei der Simulation anhand der Breitenerhebung | 76 |

Abbildungen im Anhang

| | | |
|-----|--|----|
| B.1 | Ablauf einer stündlichen Berechnung der Heiz-/Kühlleistung | 65 |
| C.1 | Standorte der eingebundenen Wetterstationen | 66 |
| C.2 | Geräteprofil Gruppen-, Einzelbüro | 72 |
| C.3 | Programmablauf einer jährlichen Simulation | 74 |

Tabellen im Anhang

| | | |
|-----|---|----|
| A.1 | Übergabeparameter im RC_BuildingSimulator | 61 |
| A.2 | Übergabeparameter im DIBS | 62 |
| B.1 | Vereinfachte Abschätzung dynamischer Parameter | 64 |
| C.1 | Zuweisungen der Nutzungsprofile DIN V 18599-10/SIA 2024 | 67 |
| C.2 | Wärmeerzeuger im DIBS | 72 |
| C.3 | Kälteerzeuger im DIBS | 73 |
| D.1 | Zuweisung der Wärmeübergabesysteme Tiefenerhebung | 75 |
| D.2 | Zuweisung der Kälteübergabesysteme Tiefenerhebung | 75 |
| D.3 | Abschätzung der inneren Wärmespeicherfähigkeit in der Breitenerhebung | 76 |
| D.4 | Zuweisung der Wärmeerzeuger Breitenerhebung | 78 |
| D.5 | Zuweisung der Wärmeübergabesysteme Breitenerhebung | 81 |
| D.6 | Zuweisung der Kälteerzeuger Breitenerhebung | 81 |
| D.7 | Zuweisung der Kälteübergabesysteme Breitenerhebung | 82 |

Anhang A

Dokumentationen der Eingangsparameter

Tabelle A.1: Übergabeparameter im RC_BuildingSimulator [Eigene Darstellung in Anlehnung an Jayathissa (2020)]

| Variablenbezeichnung | Beschreibung | Einheit |
|------------------------------------|---|--------------------|
| window_area | Summe der Außenfensterflächen | m ² |
| walls_area | Summe der Außenwände (inkl. Dachfläche) | m ² |
| floor_area | Konditionierte Nutzungsfläche | m ² |
| room_vol | Volumen des Gebäudeinnern | m ³ |
| total_internal_area | Oberflächeninhalt aller zur Gebäudezone weisenden Flächen | m ² |
| lighting_load | elektrische Leistung der Beleuchtung | W/m ² |
| lighting_control | Mindestbeleuchtungsstärke | Lux |
| lighting_utilisation_factor | Lichtausnutzungsgrad | - |
| lighting_maintenance_factor | Wartungsfaktor der Fensterflächen | - |
| u_walls | Wärmedurchgangskoeffizient der Außenwände | W/m ² K |
| u_windows | Wärmedurchgangskoeffizient der Fenster | W/m ² K |
| ach_vent | Luftwechselrate durch Ventilation | 1/h |
| ach_infl | Luftwechselrate durch Infiltration | 1/h |
| ventilation_efficiency | Effizienz der Wärmerückgewinnungseinheit der Belüftung | - |
| thermal_capacitance_per_floor_area | Innere Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes | J/m ² K |
| t_set_heating | Solltemperatur Heizung | °C |
| t_set_cooling | Solltemperatur Kühlung | °C |
| max_heating_energy_per_floor_area | Maximale Heizlast (inf für uneingeschränkte Heizung) | W |
| max_cooling_energy_per_floor_area | Maximale Kühllast (-inf für uneingeschränkte Kühlung) | W |
| heating_supply_system | Art der Heizanlage | - |
| cooling_supply_system | Art der Kühlanlage | - |
| heating_emission_system | Art der Wärmeübergabe | - |
| cooling_emission_system | Art der Kälteübergabe | - |

Tabelle A.2: Übergabeparameter im DIBS [Eigene Darstellung]

| Variablenbezeichnung | Beschreibung | Einheit |
|-----------------------------------|--|--------------------|
| scr_gebaeude_id | Gebäude-ID | - |
| plz | Postleitzahl des Gebäudestandortes | - |
| hk_geb | Gebäudedefunktion Hauptkategorie | - |
| uk_geb | Gebäudedefunktion Unterkategorie | - |
| max_occupancy | Maximale Anzahl der Personen im Gebäude | - |
| wall_area_og | Summe der oberirdischen Außenwandflächen | m ² |
| wall_area_ug | Summe der unterirdischen Außenwandflächen | m ² |
| window_area_north | Summe der Fensterflächen in Nordrichtung | m ² |
| window_area_east | Summe der Fensterflächen in Ostrichtung | m ² |
| window_area_south | Summe der Fensterflächen in Südrichtung | m ² |
| window_area_west | Summe der Fensterflächen in Westrichtung | m ² |
| net_room_area | Netto-Raumfläche des Gebäudes | m ² |
| energy_ref_area | Energiebezugsfläche | m ² |
| base_area | Fläche des unteren Gebäudeabschlusses | m ² |
| roof_area | Dachfläche | m ² |
| building_height | (mittlere) Gebäudehöhe | m |
| lighting_load | elektrische Leistung der Beleuchtung | W/m ² |
| lighting_control | Mindestbeleuchtungsstärke | Lux |
| lighting_utilisation_factor | Lichtausnutzungsgrad | - |
| lighting_maintenance_factor | Wartungsfaktor der Fensterflächen | - |
| glass_solar_transmittance | Energiedurchlassgrad der Verglasung | - |
| glass_solar_shading_transmittance | Energiedurchlassgrad der Verglasung bei aktiviertem Sonnenschutz | - |
| glass_light_transmittance | Lichttransmissionsgrad | - |
| u_walls | Wärmedurchgangskoeffizient der Außenwände | W/m ² K |
| u_windows | Wärmedurchgangskoeffizient der Fenster | W/m ² K |
| u_roof | Wärmedurchgangskoeffizient Dach | W/m ² K |
| u_base | Wärmedurchgangskoeffizient des unteren Gebäudeabschlusses | W/m ² K |
| temp_adj_base | Temperaturanpassungsfaktor für unteren Gebäudeabschluss | - |
| temp_adj_walls_ug | Temperaturanpassungsfaktor für Wandflächen unterirdisch | - |
| ach_vent | Luftwechselrate durch Belüftungsanlage | 1/h |
| ventilation_efficiency | Effizienz der Wärmerückgewinnungseinheit RLT | - |
| ach_win | Luftwechselrate durch Fensterlüftung | 1/h |
| ach_inf | Luftwechselrate durch Infiltration | 1/h |
| night_flushing_flow | Luftwechselrate bei aktivierter Nachtlüftung | 1/h |
| thermal_capacitance | Innere Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes | J/m ² K |
| t_start | Ausgangstemperatur der Simulation | °C |

| Variablenbezeichnung | Beschreibung | Einheit |
|-----------------------------------|---|----------------|
| t_set_heating | Solltemperatur Heizung | °C |
| t_set_cooling | Solltemperatur Kühlung | °C |
| max_heating_energy_per_floor_area | Maximale Heizlast (inf für uneingeschränkte Heizung) | W |
| max_cooling_energy_per_floor_area | Maximale Kühllast (-inf für uneingeschränkte Kühlung) | W |
| heating_supply_system | Art der Heizanlage | - |
| heating_emission_system | Art der Wärmeübergabe | - |
| cooling_supply_system | Art der Kühlanlage | - |
| cooling_emission_system | Art der Kälteübergabe | - |

Anhang B

Ergänzungen zur DIN EN ISO 13790:2008-09

Tabelle B.1: Vereinfachte Abschätzung dynamischer Parameter [Eigene Darstellung in
Anlehnung an EN ISO 13790:2008-09, S. 81]

| Bauschwere | A_m [in m^2] | C_m [in J/K] |
|-------------|--------------------------|--------------------------|
| Sehr leicht | $2,5 \cdot A_f$ | $80000 \cdot A_f$ |
| Leicht | $2,5 \cdot A_f$ | $110000 \cdot A_f$ |
| Mittel | $2,5 \cdot A_f$ | $165000 \cdot A_f$ |
| Schwer | $3 \cdot A_f$ | $260000 \cdot A_f$ |
| Sehr schwer | $3,5 \cdot A_f$ | $370000 \cdot A_f$ |

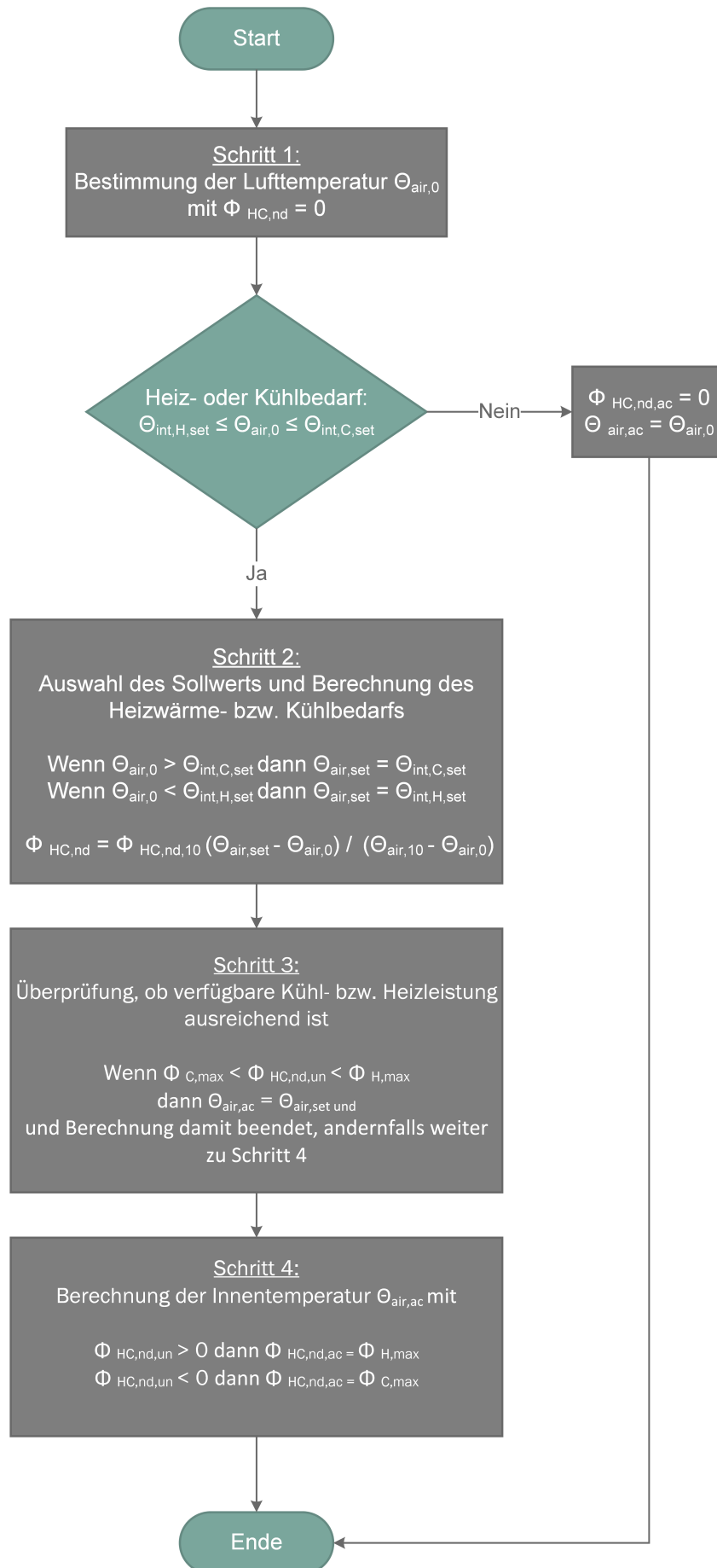


Abbildung B.1: Ablauf einer stündlichen Berechnung der Heiz-/Kühlleistung [Eigene Darstellung]

Anhang C

Ergänzungen zum DIBS

C.1 Standorte der eingebundenen Wetterstationen



Abbildung C.1: Standorte der eingebundenen Wetterstationen [Eigene Darstellung]

C.2 Zuweisungen der Nutzungsprofile

Tabelle C.1: Zuweisung der Nutzungsprofile DIN V 18599-10/SIA 2024 [Eigene Darstellung]

| Hauptkategorie | Unterkategorie | Nutzungstyp 18599-10 | Nutzungstyp SIA 2024 |
|--|---|--|----------------------|
| Büro-, Verwaltungs- oder Amtsgebäude | Parlaments- oder Gerichtsgebäude | Gruppenbüro (2 bis 6 Arbeitsplätze) | Einzel-, Gruppenbüro |
| Büro-, Verwaltungs- oder Amtsgebäude | Öffentliches Verwaltungs- oder Ämtergebäude, Rathaus | Gruppenbüro (2 bis 6 Arbeitsplätze) | Einzel-, Gruppenbüro |
| Büro-, Verwaltungs- oder Amtsgebäude | Bürogebäude | Gruppenbüro (2 bis 6 Arbeitsplätze) | Einzel-, Gruppenbüro |
| Büro-, Verwaltungs- oder Amtsgebäude | Rundfunk- oder Fernsehanstalt | Gruppenbüro (2 bis 6 Arbeitsplätze) | Einzel-, Gruppenbüro |
| Büro-, Verwaltungs- oder Amtsgebäude | Polizeipräsidium oder -station, Bürogebäude sonstiger Bereitschaftsdienste | Großraumbüro (ab 7 Arbeitsplätze) | Großraumbüro |
| Gebäude für Forschung und Hochschullehre | Hörsaalgebäude | Hörsaal, Auditorium | Hörsaal |
| Gebäude für Forschung und Hochschullehre | Verwaltungs- oder Seminargebäude | Gruppenbüro (2 bis 6 Arbeitsplätze) | Großraumbüro |
| Gebäude für Forschung und Hochschullehre | Institutsgebäude für Forschung und Lehre (Labor mit geringen Anforderungen an die Raumluftechnik, z.B. Medizin, Informatik) | Labor | Laborraum |
| Gebäude für Forschung und Hochschullehre | Institutsgebäude für Forschung und Lehre (Labor mit hohen Anforderungen an die Raumluftechnik, z.B. Chemie, Tierforschung) | Labor | Laborraum |
| Gebäude für Forschung und Hochschullehre | Bürogebäude von Forschungsanstalten ohne Lehre | Gruppenbüro (2 bis 6 Arbeitsplätze) | Einzel-, Gruppenbüro |
| Gebäude für Forschung und Hochschullehre | Laborgebäude von Forschungsanstalten und Unternehmen (Labor mit geringen Anforderungen an die Raumluftechnik) | Labor | Laborraum |
| Gebäude für Forschung und Hochschullehre | Laborgebäude von Forschungsanstalten und Unternehmen (Labor mit hohen Anforderungen an die Raumluftechnik) | Labor | Laborraum |
| Gebäude für Gesundheit und Pflege | Hochschulklinik | Bettzimmer (Zweibettzimmer im Krankenhaus, Pflegeheim) | Bettzimmer |
| Gebäude für Gesundheit und Pflege | Krankenhaus | Bettzimmer (Zweibettzimmer im Krankenhaus, Pflegeheim) | Bettzimmer |
| Gebäude für Gesundheit und Pflege | Gebäude für teilstationäre Versorgung (z.B. Tagesklinik, Geburtshaus) | Bettzimmer (Zweibettzimmer im Krankenhaus, Pflegeheim) | Bettzimmer |
| Gebäude für Gesundheit und Pflege | Rehabilitation | Fitnessraum (Untersuchungs- und Behandlungsräume) | Fitnessraum |
| Gebäude für Gesundheit und Pflege | Kur und Genesung | Bettzimmer (Zweibettzimmer im Krankenhaus, Pflegeheim) | Bettzimmer |
| Gebäude für Gesundheit und Pflege | Medizinisches Versorgungszentrum, Ärztehaus | Arztpraxen und therapeutische Praxen | Behandlungsraum |
| Gebäude für Gesundheit und Pflege | Arztpraxis | Arztpraxen und therapeutische Praxen | Behandlungsraum |
| Gebäude für Gesundheit und Pflege | Notfallpraxis | Arztpraxen und therapeutische Praxen | Behandlungsraum |

| Hauptkategorie | Unterkategorie | Nutzungstyp 18599-10 | Nutzungstyp SIA 2024 |
|---|---|--|----------------------|
| Gebäude für Gesundheit und Pflege | Altenheim/Altenpflegeheim (ohne eigene Haushaltsführung der Bewohner/innen) | Bettenzimmer (Zweibettzimmer im Krankenhaus, Pflegeheim) | Bettenzimmer |
| Gebäude für Gesundheit und Pflege | Pflegeheim für Behinderte (ohne eigene Haushaltsführung der Bewohner/innen) | Bettenzimmer (Zweibettzimmer im Krankenhaus, Pflegeheim) | Bettenzimmer |
| Gebäude für Gesundheit und Pflege | Psychiatrische Pflegeheim (ohne eigene Haushaltsführung der Bewohner/innen) | Bettenzimmer (Zweibettzimmer im Krankenhaus, Pflegeheim) | Bettenzimmer |
| Gebäude für Gesundheit und Pflege | Tagespflegeeinrichtung | Bettenzimmer (Zweibettzimmer im Krankenhaus, Pflegeheim) | Bettenzimmer |
| Gebäude für Gesundheit und Pflege | Hospiz | Bettenzimmer (Zweibettzimmer im Krankenhaus, Pflegeheim) | Bettenzimmer |
| Schule, Kindertagesstätte und sonstiges Betreuungsgebäude | Schule, allgemein | Klassenzimmer (Schule), Gruppenraum (Kindergärten) | Schulzimmer |
| Schule, Kindertagesstätte und sonstiges Betreuungsgebäude | Ganztagesschule | Klassenzimmer (Schule), Gruppenraum (Kindergärten) | Schulzimmer |
| Schule, Kindertagesstätte und sonstiges Betreuungsgebäude | Internatsschule | Klassenzimmer (Schule), Gruppenraum (Kindergärten) | Schulzimmer |
| Schule, Kindertagesstätte und sonstiges Betreuungsgebäude | Förder-, Sonderschule | Klassenzimmer (Schule), Gruppenraum (Kindergärten) | Schulzimmer |
| Schule, Kindertagesstätte und sonstiges Betreuungsgebäude | Berufsbildende Schule (gewerblich, wirtschaftlich) | Klassenzimmer (Schule), Gruppenraum (Kindergärten) | Schulzimmer |
| Schule, Kindertagesstätte und sonstiges Betreuungsgebäude | Berufsbildende Schule (mit höherer technischer Ausstattung, z.B. Werkstätten) | Klassenzimmer (Schule), Gruppenraum (Kindergärten) | Schulzimmer |
| Schule, Kindertagesstätte und sonstiges Betreuungsgebäude | Berufsakademie, Berufskolleg | Klassenzimmer (Schule), Gruppenraum (Kindergärten) | Schulzimmer |
| Schule, Kindertagesstätte und sonstiges Betreuungsgebäude | Bildungszentrum | Klassenzimmer (Schule), Gruppenraum (Kindergärten) | Schulzimmer |
| Schule, Kindertagesstätte und sonstiges Betreuungsgebäude | Ausbildungsstätte | Klassenzimmer (Schule), Gruppenraum (Kindergärten) | Schulzimmer |
| Schule, Kindertagesstätte und sonstiges Betreuungsgebäude | Volkshochschule | Klassenzimmer (Schule), Gruppenraum (Kindergärten) | Schulzimmer |
| Schule, Kindertagesstätte und sonstiges Betreuungsgebäude | KiTa | Klassenzimmer (Schule), Gruppenraum (Kindergärten) | Schulzimmer |
| Schule, Kindertagesstätte und sonstiges Betreuungsgebäude | KiTa mit Küche | Klassenzimmer (Schule), Gruppenraum (Kindergärten) | Schulzimmer |
| Schule, Kindertagesstätte und sonstiges Betreuungsgebäude | Studentenhaus | Wohnen (MFH) | Wohnen MFH |

| Hauptkategorie | Unterkategorie | Nutzungstyp 18599-10 | Nutzungstyp SIA 2024 |
|---|---|--|----------------------|
| Schule, Kindertagesstätte und sonstiges Betreuungsgebäude | Altentagesstätte | Bettenzimmer (Zweibettzimmer im Krankenhaus, Pflegeheim) | Bettenzimmer |
| Schule, Kindertagesstätte und sonstiges Betreuungsgebäude | Jugendzentrum | Besprechung/Sitzungszimmer/Seminar | Sitzungszimmer |
| Gebäude für Kultur und Freizeit | Bibliothek/Archiv (einfach, z.B. Stadtbücherei) | Bibliothek - Freihandbereich | Bibliothek |
| Gebäude für Kultur und Freizeit | Bibliothek/Archiv (höher technisiert, z.B. Unibibliothek) | Bibliothek - Lesesaal | Bibliothek |
| Gebäude für Kultur und Freizeit | Ausstellungsgebäude (Museen, Galerien) | Ausstellungsräume, Museum | Ausstellungshalle |
| Gebäude für Kultur und Freizeit | Oper, Theater und Veranstaltungshalle, Kino, Konferenzzentrum | Bühne (Theater, Veranstaltungsbauten) | Vorstellungsraum |
| Gebäude für Kultur und Freizeit | Freizeit-, Gemeinschafts-, Bürgerhaus | Besprechung/Sitzungszimmer/Seminar | Sitzungszimmer |
| Gebäude für Kultur und Freizeit | Spielcasino, -bank, -halle | Besprechung/Sitzungszimmer/Seminar | Ausstellungshalle |
| Sportgebäude | Einfeldhalle | Turnhalle (ohne Zuschauerbereich) | Turnhalle |
| Sportgebäude | Mehrfeldhalle | Turnhalle (ohne Zuschauerbereich) | Turnhalle |
| Sportgebäude | Gymnastikhalle | Turnhalle (ohne Zuschauerbereich) | Turnhalle |
| Sportgebäude | Sporthalle mit Mehrzwecknutzung | Turnhalle (ohne Zuschauerbereich) | Mehrzweckhalle |
| Sportgebäude | Hallenbad | Turnhalle (ohne Zuschauerbereich) | Schwimmhalle |
| Sportgebäude | Spaß- und Freizeitbad | Turnhalle (ohne Zuschauerbereich) | Schwimmhalle |
| Sportgebäude | Thermalbad | Turnhalle (ohne Zuschauerbereich) | Schwimmhalle |
| Sportgebäude | Hallenbad mit Freibadanlage | Turnhalle (ohne Zuschauerbereich) | Schwimmhalle |
| Sportgebäude | Kegelbahn/Bowling | Turnhalle (ohne Zuschauerbereich) | Turnhalle |
| Sportgebäude | Schießstand | Turnhalle (ohne Zuschauerbereich) | Lagerhalle |
| Sportgebäude | Raumschießanlage | Turnhalle (ohne Zuschauerbereich) | Lagerhalle |
| Sportgebäude | Reithalle | Lagerhallen, Logistikhallen | Lagerhalle |
| Sportgebäude | Eissporthalle | Lagerhallen, Logistikhallen | Lagerhalle |
| Sportgebäude | Tennishalle | Turnhalle (ohne Zuschauerbereich) | Turnhalle |
| Sportgebäude | Fitnessstudio | Fitnessraum | Fitnessraum |
| Sportgebäude | Gebäude für Sportaußenanlage (Tribünen-, Umkleidegebäude) | Sonstige Aufenthaltsräume (Garderobe, Teeküche, Lager, Archiv, Flur) | Garderobe, Dusche |
| Beherbergungs- oder Gastronomie- oder Verpflegungsgebäude | Herberge, Ferienheim, Ferienhaus, Hotel/Pension einfach | Hotelzimmer (Doppelzimmer) | Hotelzimmer |
| Beherbergungs- oder Gastronomie- oder Verpflegungsgebäude | Sterne-Hotel | Hotelzimmer (Doppelzimmer) | Hotelzimmer |

| Hauptkategorie | Unterkategorie | | Nutzungstyp 18599-10 | Nutzungstyp SIA 2024 |
|--|---|--|---|----------------------------|
| Beherbergungs- Gastronomie- oder Verpflegungsgebäude | Unterbringungsgebäude, Gastronomie- oder Verpflegungsgebäude | Ausschankwirtschaft | Kantine (Restaurant) | Restaurant |
| Beherbergungs- Gastronomie- oder Verpflegungsgebäude | Unterbringungsgebäude, Gastronomie- oder Verpflegungsgebäude | Speisegaststätte (einfach) | Kantine (Restaurant) | Restaurant |
| Beherbergungs- Gastronomie- oder Verpflegungsgebäude | Unterbringungsgebäude, Gastronomie- oder Verpflegungsgebäude | Restaurant (gehoben) | Kantine (Restaurant) | Restaurant |
| Beherbergungs- Gastronomie- oder Verpflegungsgebäude | Unterbringungsgebäude, Gastronomie- oder Verpflegungsgebäude | Mensa/Kantine | Kantine (Kantine) | Selbstbedienungsrestaurant |
| Beherbergungs- Gastronomie- oder Verpflegungsgebäude | Unterbringungsgebäude, Gastronomie- oder Verpflegungsgebäude | Gemeinschaftsunterkunft (z.B. Flüchtlingsheim, Kaserne, Kloster) | Wohnen (MFH) | Wohnen MFH |
| Beherbergungs- Gastronomie- oder Verpflegungsgebäude | Unterbringungsgebäude, Gastronomie- oder Verpflegungsgebäude | Sonstige Gebäudefunktion | Sonstige Aufenthaltsräume (Pausenraum, Wartezimmer) | Nebenraum |
| Produktions-, Werkstatt-, Lager- oder Betriebsgebäude | Gebäude für gewerbliche Produktion und Verarbeitung (z.B. Brauerei, Molkerei, Schlachthof) | | Gewerbliche und industrielle Hallen (mittelschwere Arbeit, überw. stehende Tätigkeit) | Produktion (grobe Arbeit) |
| Produktions-, Werkstatt-, Lager- oder Betriebsgebäude | Gebäude für industrielle Produktion und Verarbeitung (z.B. Chemie, Metall, Textilien, Lebensmittel, Holz) | | Gewerbliche und industrielle Hallen (mittelschwere Arbeit, überw. stehende Tätigkeit) | Produktion (grobe Arbeit) |
| Produktions-, Werkstatt-, Lager- oder Betriebsgebäude | Werkstattgebäude allgemein (z.B. von Handwerksbetrieben wie Klempner, Schlosser, Schreiner) | | Gewerbliche und industrielle Hallen (mittelschwere Arbeit, überw. stehende Tätigkeit) | Produktion (grobe Arbeit) |
| Produktions-, Werkstatt-, Lager- oder Betriebsgebäude | Werkstattgebäude zur Wartung, Instandsetzung, Reparatur (von z.B. Kfz) | | Gewerbliche und industrielle Hallen (mittelschwere Arbeit, überw. stehende Tätigkeit) | Produktion (grobe Arbeit) |
| Produktions-, Werkstatt-, Lager- oder Betriebsgebäude | Logistikimmobilie mit Toren bzw. Rampen | | Lagerhallen, Logistikhallen | Lagerhalle |
| Produktions-, Werkstatt-, Lager- oder Betriebsgebäude | Sonstiges Gebäude für Lagerung | | Lagerhallen, Logistikhallen | Lagerhalle |
| Produktions-, Werkstatt-, Lager- oder Betriebsgebäude | Feuerwehr, Rettungswache | | Großraumbüro (ab 7 Arbeitsplätze) | Großraumbüro |
| Produktions-, Werkstatt-, Lager- oder Betriebsgebäude | Straßenmeisterei, Bauhof u.ä. | | Lagerhallen, Logistikhallen | Lagerhalle |
| Produktions-, Werkstatt-, Lager- oder Betriebsgebäude | Fuhrpark | | Parkhaus (Büro- und Privatnutzung) | Parkhaus |
| Produktions-, Werkstatt-, Lager- oder Betriebsgebäude | zentrales Wirtschaftsgebäude (z.B. Zentralküche oder -wäscherei in Krankenhaus) | | Küche (Vorbereitung, Lager) | Küche, Teeküche |
| Produktions-, Werkstatt-, Lager- oder Betriebsgebäude | Rechenzentrum | | Rechenzentrum | Serverraum |
| Handelsgebäude | Handelsgebäude des Lebensmitteleinzel- und -großhandels | | Einzelhandel/Kaufhaus (Lebensmittelabteilung mit Kühlprodukten) | Lebensmittelverkauf |
| Handelsgebäude | Handelsgebäude des Non-Food-Einzel- und -Großhandels | | Einzelhandel/Kaufhaus | Fachgeschäft |
| Handelsgebäude | Einkaufszentrum, Shopping-Mall | | Schalterhalle | Schalterhalle, Empfang |
| Handelsgebäude | Markthalle | | Einzelhandel/Kaufhaus (Lebensmittelabteilung mit Kühlprodukten) | Lebensmittelverkauf |
| Handelsgebäude | Messehalle | | Messe/Kongress | Ausstellungshalle |

| Hauptkategorie | Unterkategorie | Nutzungstyp 18599-10 | Nutzungstyp SIA 2024 |
|--------------------------------------|--|-----------------------------------|------------------------|
| Handelsgebäude | von Dienstleistern (z.B. Frisör, Kosmetik) genutztes Ladengebäude | Einzelhandel/Kaufhaus | Fachgeschäft |
| Technikgebäude (Ver- und Entsorgung) | Kraftwerk (Gesamtanlage für Energieversorgung) | Großraumbüro (ab 7 Arbeitsplätze) | Großraumbüro |
| Technikgebäude (Ver- und Entsorgung) | Gebäude für Lenkung, Steuerung, Überwachung und Nachrichtenübermittlung (z.B. Stellwerk, Leuchtturm) | Großraumbüro (ab 7 Arbeitsplätze) | Großraumbüro |
| Technikgebäude (Ver- und Entsorgung) | Gebäude für Energieversorgung (z.B. Fernheizwerk, Tankstelle) | Großraumbüro (ab 7 Arbeitsplätze) | Großraumbüro |
| Technikgebäude (Ver- und Entsorgung) | Gebäude für Wasserversorgung | Großraumbüro (ab 7 Arbeitsplätze) | Großraumbüro |
| Technikgebäude (Ver- und Entsorgung) | Gebäude für Abwasserbehandlung | Großraumbüro (ab 7 Arbeitsplätze) | Großraumbüro |
| Technikgebäude (Ver- und Entsorgung) | Gebäude für Abfallbehandlung | Großraumbüro (ab 7 Arbeitsplätze) | Großraumbüro |
| Verkehrsgebäude | Park-/Garagegebäude, Fahrradparkhaus | Parkhaus (öffentliche Nutzung) | Parkhaus |
| Verkehrsgebäude | Halle für sonstige Verkehrsmittel (z.B. für Flugzeuge, Schienenfahrzeuge) | Verkehrsfläche (Flur) | Verkehrsfläche |
| Verkehrsgebäude | Gebäude zur Pflege von Fahrzeugen (z.B. Waschstraße) | Lagerhallen, Logistikhallen | Lagerhalle |
| Verkehrsgebäude | Empfangsgebäude (Bahnhof, Busbahnhof, Flughafen, Schiffterminal) | Schalterhalle | Schalterhalle, Empfang |

C.3 Exemplarisches Geräteprofil Einzel-, Gruppenbüro

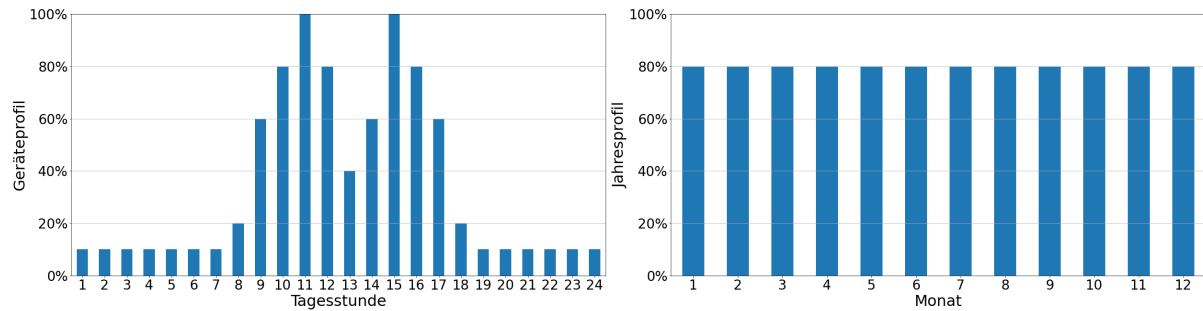


Abbildung C.2: Geräteprofil Gruppen-, Einzelbüro [Eigene Darstellung in Anlehnung an SIA 2024:2015]

C.4 Anlagenklassen und Übergabesysteme im DIBS

Tabelle C.2: Wärmeerzeuger im DIBS [Eigene Darstellung]

| Klassenbezeichnung | Beschreibung | Erzeugeraufwandszahl |
|---------------------------------|---|----------------------|
| OilBoilerStandardBefore86 | Konstanttemperaturkessel Baujahr 1978-1986, Brennstoff: Öl | 1,114 |
| OilBoilerStandardFrom95 | Konstanttemperaturkessel Baujahr ab 1995, Brennstoff: Öl | 1,087 |
| GasBoilerStandardBefore86 | Konstanttemperaturkessel Baujahr 1978-1986, Brennstoff: Gas | 1,142 |
| GasBoilerStandardBefore95 | Konstanttemperaturkessel Baujahr ab 1995, Brennstoff: Gas | 1,124 |
| GasBoilerStandardFrom95 | Konstanttemperaturkessel Baujahr ab 1995, Brennstoff: Gas | 1,114 |
| BiogasBoilerStandardFrom95 | Konstanttemperaturkessel Baujahr ab 1995, Brennstoff: Biogas | 1,0995 |
| OilBoilerLowTempBefore87 | Niedertemperaturkessel Baujahr vor 1987, Brennstoff: Öl | 1,112 |
| OilBoilerLowTempBefore95 | Niedertemperaturkessel Baujahr vor 1995, Brennstoff: Öl | 1,086 |
| OilBoilerLowTempFrom95 | Niedertemperaturkessel Baujahr ab 1995, Brennstoff: Öl | 1,067 |
| GasBoilerLowTempBefore87 | Niedertemperaturkessel Baujahr vor 1987, Brennstoff: Gas | 1,14 |
| LGasBoilerLowTempBefore87 | Niedertemperaturkessel Baujahr vor 1987, Brennstoff: L-Gas | 1,129 |
| GasBoilerLowTempBefore95 | Niedertemperaturkessel Baujahr vor 1995, Brennstoff: Gas | 1,113 |
| LGasBoilerLowTempBefore95 | Niedertemperaturkessel Baujahr ab 1995, Brennstoff: L-Gas | 1,102 |
| GasBoilerLowTempFrom95 | Niedertemperaturkessel Baujahr ab 1995, Brennstoff: Gas | 1,095 |
| LGasBoilerLowTempFrom95 | Niedertemperaturkessel Baujahr ab 1995, Brennstoff: L-Gas | 1,083 |
| GasBoilerLowTempSpecialFrom78 | Niedertemperaturkessel-Spezialkessel Baujahr ab 1978, Brennstoff: Gas | 1,113 |
| GasBoilerLowTempSpecialFrom95 | Niedertemperaturkessel-Spezialkessel Baujahr ab 1995, Brennstoff: Gas | 1,093 |
| OilBoilerCondensingBefore95 | Brennwertkessel Baujahr vor 1995, Brennstoff: Öl | 1,03 |
| OilBoilerCondensingFrom95 | Brennwertkessel Baujahr ab 1995, Brennstoff: Öl | 1,028 |
| GasBoilerCondensingBefore95 | Brennwertkessel Baujahr vor 1995, Brennstoff: Gas | 1,057 |
| LGasBoilerCondensingBefore95 | Brennwertkessel Baujahr ab 1995, Brennstoff: L-Gas | 1,047 |
| BiogasBoilerCondensingBefore95 | Brennwertkessel Baujahr vor 1995, Brennstoff: Biogas | 1,057 |
| BiogasBoilerCondensingFrom95 | Brennwertkessel Baujahr nach 1995, Brennstoff: Biogas | 1,054 |
| BiogasOilBoilerCondensingFrom95 | Brennwertkessel Baujahr nach 1995, Brennstoff: Bioöl/-gas | 1,041 |
| GasBoilerCondensingFrom95 | Brennwertkessel Baujahr ab 1995, Brennstoff: Gas | 1,054 |
| LGasBoilerCondensingFrom95 | Brennwertkessel Baujahr ab 1995, Brennstoff: L-Gas | 1,044 |

| Klassenbezeichnung | Beschreibung | Erzeugeraufwandszahl |
|-----------------------------------|---|----------------------|
| BioGasBoilerCondensingFrom95 | Brennwertkessel Baujahr ab 1995, Brennstoff: Biogas | 1,054 |
| OilBoilerCondensingImproved | Brennwertkessel verbessert, Brennstoff: Öl | 1,004 |
| GasBoilerCondensingImproved | Brennwertkessel verbessert, Brennstoff: Gas | 1,028 |
| LGasBoilerCondensingImproved | Brennwertkessel verbessert, Brennstoff: L-Gas | 1,019 |
| BiogasOilBoilerCondensingImproved | Brennwertkessel verbessert, Brennstoff: Bioöl/-gas | 1,016 |
| WoodChipSolidFuelBoiler | Feststoffkessel mit Pufferspeicher ab 1995 (Holzhack) | 1,056 |
| WoodPelletSolidFuelBoiler | Feststoffkessel mit Pufferspeicher ab 1995 (Holzpellet) | 1,054 |
| CoalSolidFuelBoiler | Kombination Feststoffkessel 1978-1994 (Steinkohle) und Feststoffkessel 1978-1994 (Braunkohle) | 1,123 |
| SolidFuelLiquidFuelFurnace | Mit Brennstoff betriebene Öfen | 1,43 ¹ |
| HeatPumpAirSource | - | - |
| HeatPumpGroundSource | - | - |
| GasCHP | - | - |
| ElectricHeating | Elektroheizung, 100 % Umwandlung in Wärme | 1 |
| DistrictHeating | Nah-und Fernwärme, Brennstoff: nicht spezifiziert | 1,002 |

Tabelle C.3: Kälteerzeuger im DIBS [Eigene Darstellung]

| Klassenbezeichnung | Beschreibung | EER(+) |
|-------------------------------|---|------------------|
| AirCooledPistonScroll | Wärmeabfuhr Kältemaschine (Kondensator): Luftgekühlt; Verdichterart: Kolben-/Scrollverdichter - on/off Betrieb | 3,1 ² |
| AirCooledPistonScrollMulti | Wärmeabfuhr Kältemaschine (Kondensator): Luftgekühlt; Verdichterart: Kolben-/Scrollverdichter - mehrstufig | 3,1 ³ |
| WaterCooledPistonScroll | Wärmeabfuhr Kältemaschine (Kondensator): Wassergekühlt; Verdichterart: Kolben-/Scrollverdichter - on/off Betrieb | 3,2 ⁴ |
| AbsorptionRefrigerationSystem | Wärmeabfuhr Kältemaschine (Kondensator): Wassergekühlt; Verdichterart: Absorptionskälteanlage H ₂ O/LiBr | - ⁵ |
| NoCooling | Gebäude hat keine Möglichkeit zur Kühlung | - |

¹ Mindestwirkungsgrad gem. Anlage 4 1. BImSchV

² Vgl. Bundesamt für Energie (2017), S. 4.

³ Vgl. Bundesamt für Energie (2017), S. 4.

⁴ Vgl. Bundesamt für Energie (2017), S. 4.

⁵ Annahme: Die Antriebswärme stammt aus Abwärme und nicht aus fossilen Brennstoffen. Im Vergleich zu Kompressionskältemaschinen haben Absorptionskältemaschinen in der Regel einen geringeren Wirkungsgrad, daher wird davon ausgegangen, dass Bauherren Absorptionskältemaschinen nur dann einsetzen, wenn sie auch einen „kostenlosen“ Zugang zu Wärme haben (Vgl. Frey (2019), S. 225).

C.5 Ablauf einer jährl. Simulation im DIBS

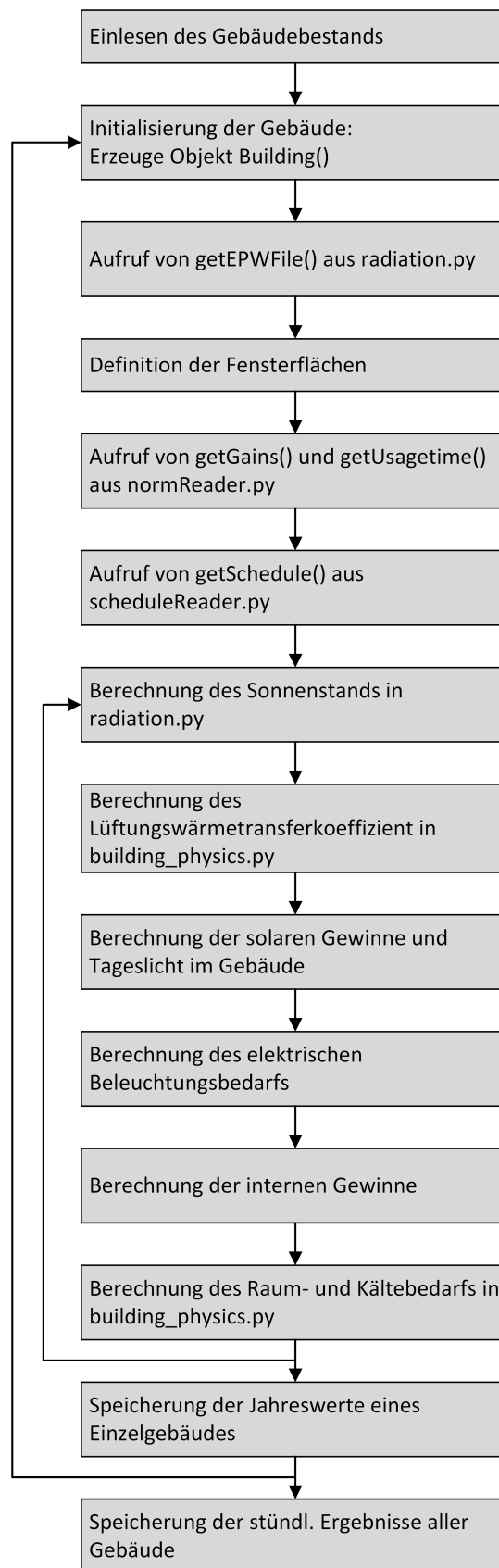


Abbildung C.3: Programmablauf einer jährlichen Simulation [Eigene Darstellung]

Anhang D

Zuweisungen bei der Simulation mit Daten der Tiefen-/Breitenerhebung

D.1 Zuweisungen bei der Simulation anhand der Tiefenerhebung

Tabelle D.1: Zuweisung der Wärmeübergabesysteme Tiefenerhebung [Eigene Darstellung]

| Wärmeübergabesystem Tiefenerhebung | Temperaturknoten DIBS |
|---|------------------------------|
| Direktheizung | Lufttemperaturknoten |
| Elektrische Speicherheizung | Lufttemperaturknoten |
| Flächen-Heizung (55/45) [Standard] | Oberflächenknoten |
| Flächen-Heizung (35/28) | Oberflächenknoten |
| Heizkörper (55/45) | Lufttemperaturknoten |
| Heizkörper (70/55) [Standard] | Lufttemperaturknoten |
| Heizkörper (90/70) | Lufttemperaturknoten |
| Indirekt beheizt | Masseknoten |
| Luftheizung | Lufttemperaturknoten |
| Strahlungsheizung (Gas) | Lufttemperaturknoten |

Tabelle D.2: Zuweisung der Kälteübergabesysteme Tiefenerhebung [Eigene Darstellung]

| Kälteübergabesystem Tiefenerhebung | Temperaturknoten DIBS |
|---|------------------------------|
| 6 / 12 °C | Lufttemperaturknoten |
| Bauteilaktivierung | Masseknoten |
| Kompaktklimagerät (Fenster, Wand) | Lufttemperaturknoten |
| Kühldecke | Oberflächenknoten |
| Multi-Split-System - ein/aus | Lufttemperaturknoten |

| Kälteübergabesystem Tieferenerhebung | Temperaturknoten DIBS |
|--|-----------------------|
| Multi-Split-System - stetig geregelt | Lufttemperaturknoten |
| Split-System - ein/aus | Lufttemperaturknoten |
| Split-System - stetig geregelt | Lufttemperaturknoten |
| VRF-System variabler Kühlmassenstrom (Gas) | Lufttemperaturknoten |
| Ventilatorkonvektor | Lufttemperaturknoten |

D.2 Zuweisungen bei der Simulation anhand der Breitenerhebung

Tabelle D.3: Abschätzung der inneren Wärmespeicherfähigkeit in der Breitenerhebung
[Eigene Darstellung]

| Bauweise | Konstruktion | Bauschwere |
|---|--|------------|
| Massive Bauweise (z. B. Mauerwerk, Beton) | Einschalige, massive Bauweise mit leichten Baustoffen (z. B. Leicht- oder Porenbeton, Wärmedämmziegel) | schwer |
| Massive Bauweise (z. B. Mauerwerk, Beton) | Einschalige, massive Bauweise mit leichten Baustoffen (z. B. Leicht- oder Porenbeton, Wärmedämmziegel) mit Zusatzdämmung | mittel |
| Massive Bauweise (z. B. Mauerwerk, Beton) | Einschalige, massive Bauweise mit schweren Baustoffen (z. B. Stahlbeton, Ziegel, Naturstein) | schwer |
| Massive Bauweise (z. B. Mauerwerk, Beton) | Zweischalige, massive Bauweise (z.B. mit gemauerter Vorsatzschale vor einem mit Luft oder Dämmstoff gefüllten Zwischenraum) | schwer |
| Massive Bauweise (z. B. Mauerwerk, Beton) | Bauweise mit vorgehängter, hinterlüfteter Verkleidung (z .B. mit Metallpaneelen verkleidet oder mit vorgehängten Betonteilen bzw. Natursteinplatten) | mittel |
| Massive Bauweise (z. B. Mauerwerk, Beton) | Fertigteilbau (z.B. Betonfertigteile, Großtafelbauweise, Systembau) | mittel |
| Massive Bauweise (z. B. Mauerwerk, Beton) | keine Angabe | mittel |
| Leichtbauweise (z. B. Holz, Metall, Fachwerk) | Sandwichpaneele | leicht |
| Leichtbauweise (z. B. Holz, Metall, Fachwerk) | Holztafel- oder Holzrahmenbauweise | leicht |
| Leichtbauweise (z. B. Holz, Metall, Fachwerk) | Fachwerkbauweise | leicht |
| Leichtbauweise (z. B. Holz, Metall, Fachwerk) | keine Angabe | leicht |

| Bauweise | Konstruktion | Klasse |
|------------------------------------|---|---------------|
| Fassadensystem (z. B. Glasfassade) | Pfosten-Riegel-Fassade (Glasfassade mit Pfosten) | mittel |
| Fassadensystem (z. B. Glasfassade) | Structural-Glazing-Fassade (halterlose Ganzglasfassade) | mittel |
| Fassadensystem (z. B. Glasfassade) | Vorhangfassade | mittel |
| Fassadensystem (z. B. Glasfassade) | Doppelfassade | mittel |
| Fassadensystem (z. B. Glasfassade) | keine Angabe | mittel |

Tabelle D.4: Zuweisung der Wärmeerzeuger Breitenerhebung [Eigene Darstellung]

| Kategorie des Wärmeerzeugers | Art des Wärmeerzeugers | Energieträger | Klasse DIBS |
|------------------------------|--|----------------|---------------------------------|
| zentral elektrisch | Sonstige zentral elektrische Wärmeerzeuger oder keine Angabe | elektr. Strom | ElectricHeating |
| zentral elektrisch | Wärmepumpe | elektr. Strom | HeatPumpGroundSource |
| zentral elektrisch | zentraler, elektrisch beheizter Wärmeerzeuger | elektr. Strom | ElectricHeating |
| dezentral elektrisch | Sonstige dezentral elektrische Wärmeerzeuger oder keine Angabe | elektr. Strom | ElectricHeating |
| dezentral elektrisch | Elektrische Direktheizung | elektr. Strom | ElectricHeating |
| dezentral elektrisch | Elektrische Nachtspeicherheizung | elektr. Strom | ElectricHeating |
| zentral Brennstoff | Heizkessel | Erdgas | GasBoilerCondensingFrom95 |
| zentral Brennstoff | Heizkessel | Flüssiggas | LGasBoilerCondensingFrom95 |
| zentral Brennstoff | Heizkessel | Heizöl | OilBoilerCondensingFrom95 |
| zentral Brennstoff | Heizkessel | Bioöl/-gas | BiogasOilBoilerCondensingFrom95 |
| zentral Brennstoff | Heizkessel | Holz | WoodPelletSolidFuelBoiler |
| zentral Brennstoff | Heizkessel | feste Biomasse | WoodPelletSolidFuelBoiler |
| zentral Brennstoff | Heizkessel | Kohle | CoalSolidFuelBoiler |
| zentral Brennstoff | Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (z.B. BHKW) | Erdgas | GasCHP |
| zentral Brennstoff | Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (z.B. BHKW) | Flüssiggas | GasCHP |
| zentral Brennstoff | Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (z.B. BHKW) | Heizöl | GasCHP |
| zentral Brennstoff | Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (z.B. BHKW) | Bioöl/-gas | GasCHP |
| zentral Brennstoff | Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (z.B. BHKW) | Holz | GasCHP |
| zentral Brennstoff | Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (z.B. BHKW) | feste Biomasse | GasCHP |
| zentral Brennstoff | Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (z.B. BHKW) | Kohle | GasCHP |
| zentral Brennstoff | Wärmepumpe (mit Brennstoff betrieben) ¹ | Erdgas | HeatPumpGroundSource |
| zentral Brennstoff | Wärmepumpe (mit Brennstoff betrieben) | Flüssiggas | HeatPumpGroundSource |
| zentral Brennstoff | Wärmepumpe (mit Brennstoff betrieben) | Heizöl | HeatPumpGroundSource |
| zentral Brennstoff | Wärmepumpe (mit Brennstoff betrieben) | Bioöl/-gas | HeatPumpGroundSource |
| zentral Brennstoff | Wärmepumpe (mit Brennstoff betrieben) | Holz | HeatPumpGroundSource |
| zentral Brennstoff | Wärmepumpe (mit Brennstoff betrieben) | feste Biomasse | HeatPumpGroundSource |
| zentral Brennstoff | Wärmepumpe (mit Brennstoff betrieben) | Kohle | HeatPumpGroundSource |

¹ Annahme: Brennstoff betriebene Wärmepumpen werden vereinfacht mit elektrischem Strom betrieben

| Kategorie des Wärmeerzeugers | Art des Wärmeerzeugers | Energieträger | Klasse DIBS |
|------------------------------|---|----------------|-----------------------------------|
| zentral Brennstoff | Sonstige zentral Brennstoff Wärmeerzeuger oder keine Angabe | Erdgas | GasBoilerCondensingFrom95 |
| zentral Brennstoff | Sonstige zentral Brennstoff Wärmeerzeuger oder keine Angabe | Flüssiggas | LGasBoilerCondensingFrom95 |
| zentral Brennstoff | Sonstige zentral Brennstoff Wärmeerzeuger oder keine Angabe | Heizöl | OilBoilerCondensingFrom95 |
| zentral Brennstoff | Sonstige zentral Brennstoff Wärmeerzeuger oder keine Angabe | Bioöl/-gas | BiogasOilBoilerCondensingFrom95 |
| zentral Brennstoff | Sonstige zentral Brennstoff Wärmeerzeuger oder keine Angabe | Holz | WoodPelletSolidFuelBoiler |
| zentral Brennstoff | Sonstige zentral Brennstoff Wärmeerzeuger oder keine Angabe | feste Biomasse | WoodPelletSolidFuelBoiler |
| zentral Brennstoff | Sonstige zentral Brennstoff Wärmeerzeuger oder keine Angabe | Kohle | CoalSolidFuelBoiler |
| dezentral Brennstoff | Öfen, dezentral, mit Brennstoff betrieben | Erdgas | SolidFuelLiquidFuelFurnace |
| dezentral Brennstoff | Öfen, dezentral, mit Brennstoff betrieben | Flüssiggas | SolidFuelLiquidFuelFurnace |
| dezentral Brennstoff | Öfen, dezentral, mit Brennstoff betrieben | Heizöl | SolidFuelLiquidFuelFurnace |
| dezentral Brennstoff | Öfen, dezentral, mit Brennstoff betrieben | Bioöl/-gas | SolidFuelLiquidFuelFurnace |
| dezentral Brennstoff | Öfen, dezentral, mit Brennstoff betrieben | Holz | SolidFuelLiquidFuelFurnace |
| dezentral Brennstoff | Öfen, dezentral, mit Brennstoff betrieben | feste Biomasse | SolidFuelLiquidFuelFurnace |
| dezentral Brennstoff | Öfen, dezentral, mit Brennstoff betrieben | Kohle | SolidFuelLiquidFuelFurnace |
| dezentral Brennstoff | Gas-betriebene Hell- oder Dunkelstrahler | Erdgas | GasBoilerLowTempBefore95 |
| dezentral Brennstoff | Gas-betriebene Hell- oder Dunkelstrahler | Flüssiggas | LGasBoilerLowTempBefore95 |
| dezentral Brennstoff | Gas-betriebene Hell- oder Dunkelstrahler | Heizöl | OilBoilerLowTempBefore95 |
| dezentral Brennstoff | Gas-betriebene Hell- oder Dunkelstrahler | Bioöl/-gas | BiogasOilBoilerLowTempBefore95 |
| dezentral Brennstoff | Gas-betriebene Hell- oder Dunkelstrahler | Holz | WoodSolidFuelBoilerCentral |
| dezentral Brennstoff | Gas-betriebene Hell- oder Dunkelstrahler | feste Biomasse | WoodSolidFuelBoilerCentral |
| dezentral Brennstoff | Gas-betriebene Hell- oder Dunkelstrahler | Kohle | CoalSolidFuelBoiler |
| dezentral Brennstoff | Dezentrale Etagenheizung | Erdgas | GasBoilerCondensingImproved |
| dezentral Brennstoff | Dezentrale Etagenheizung | Flüssiggas | LGasBoilerCondensingImproved |
| dezentral Brennstoff | Dezentrale Etagenheizung | Heizöl | OilBoilerCondensingImproved |
| dezentral Brennstoff | Dezentrale Etagenheizung | Bioöl/-gas | BiogasOilBoilerCondensingImproved |
| dezentral Brennstoff | Dezentrale Etagenheizung | Holz | WoodPelletSolidFuelBoiler |
| dezentral Brennstoff | Dezentrale Etagenheizung | feste Biomasse | WoodPelletSolidFuelBoiler |
| dezentral Brennstoff | Dezentrale Etagenheizung | Kohle | CoalSolidFuelBoiler |
| dezentral Brennstoff | Sonstige dezentral Brennstoff Wärmeerzeuger oder keine Angabe | Erdgas | GasBoilerCondensingFrom95 |

| Kategorie des Wärmeerzeugers | Art des Wärmeerzeugers | Energieträger | Klasse DIBS |
|------------------------------|---|---------------------|---------------------------------|
| dezentral Brennstoff | Sonstige dezentral Brennstoff Wärmeerzeuger oder keine Angabe | Flüssiggas | LGasBoilerCondensingFrom95 |
| dezentral Brennstoff | Sonstige dezentral Brennstoff Wärmeerzeuger oder keine Angabe | Heizöl | OilBoilerCondensingFrom95 |
| dezentral Brennstoff | Sonstige dezentral Brennstoff Wärmeerzeuger oder keine Angabe | Bioöl/-gas | BiogasOilBoilerCondensingFrom95 |
| dezentral Brennstoff | Sonstige dezentral Brennstoff Wärmeerzeuger oder keine Angabe | Holz | WoodPelletSolidFuelBoiler |
| dezentral Brennstoff | Sonstige dezentral Brennstoff Wärmeerzeuger oder keine Angabe | feste Biomasse | WoodPelletSolidFuelBoiler |
| dezentral Brennstoff | Sonstige dezentral Brennstoff Wärmeerzeuger oder keine Angabe | Kohle | CoalSolidFuelBoiler |
| Nah- oder Fernwärme | Heizwerken mit fossilem Brennstoff | Nah- oder Fernwärme | DistrictHeating |
| Nah- oder Fernwärme | Heizwerken mit erneuerbarem Brennstoff | Nah- oder Fernwärme | DistrictHeating |
| Nah- oder Fernwärme | Kraft-Wärme-Kopplung mit fossilem Brennstoff | Nah- oder Fernwärme | DistrictHeating |
| Nah- oder Fernwärme | Kraft-Wärme-Kopplung mit erneuerbarem Brennstoff | Nah- oder Fernwärme | DistrictHeating |
| Nah- oder Fernwärme | Abwärme (z.B. aus industriellen Prozessen) | Nah- oder Fernwärme | DistrictHeating |
| Nah- oder Fernwärme | Sonstige Nah- oder Fernwärme oder keine Angabe | Nah- oder Fernwärme | DistrictHeating |

Tabelle D.5: Wärmeübergabesysteme Breitenerhebung [Eigene Darstellung]

| Wärmeübergabesystem Breitenerhebung | Temperaturknoten DIBS |
|---|-----------------------|
| Heizkörper | Lufttemperaturknoten |
| Konvektoren | Lufttemperaturknoten |
| Fußbodenheizung | Oberflächenknoten |
| Deckenheizung (bzw. Heiz-Kühl-Decke) | Lufttemperaturknoten |
| Thermisch aktivierte Bauteile (Systeme, welche Gebäudemassen zur Temperaturregulierung nutzen, z.B. thermoaktive Decke) | Masseknoten |
| Deckenstrahlplatten | Lufttemperaturknoten |
| Luftheizung (erzeugte Wärme wird über ein Gebläse oder eine raumluftechnische Anlage eingebracht) | Lufttemperaturknoten |

Tabelle D.6: Zuweisung der Kälteerzeuger Breitenerhebung [Eigene Darstellung]

| Art des Kälteerzeugers | Rückkühlung | Kälteerzeuger DIBS |
|--|-------------------------|-------------------------------|
| Kompressionskältemaschine (elektrisch betrieben) | Wasserkühlung (trocken) | WaterCooledPistonScroll |
| Kompressionskältemaschine (elektrisch betrieben) | Wasserkühlung (nass) | WaterCooledPistonScroll |
| Kompressionskältemaschine (elektrisch betrieben) | Luftkühlung | AirCooledPistonScroll |
| Kompressionskältemaschine (elektrisch betrieben) | Weiß nicht | WaterCooledPistonScroll |
| Absorptionskälte-maschine (mit Wärme betrieben) | Wasserkühlung (trocken) | AbsorptionRefrigerationSystem |
| Absorptionskälte-maschine (mit Wärme betrieben) | Wasserkühlung (nass) | AbsorptionRefrigerationSystem |
| Absorptionskälte-maschine (mit Wärme betrieben) | Luftkühlung | AbsorptionRefrigerationSystem |
| Absorptionskälte-maschine (mit Wärme betrieben) | Weiß nicht | AbsorptionRefrigerationSystem |
| Nah- oder Fernkälte | | DistrictCooling |

Tabelle D.7: Zuweisung der Kälteübergabesysteme Breitenerhebung [Eigene Darstellung]

| Kälteübergabesystem Breitenerhebung | Temperaturknoten DIBS |
|--|------------------------------|
| Klimaanlage (raumluftechnische Anlage) | Lufttemperaturknoten |
| Ventilator-konvektoren (z.B. in der Fensterbrüstung) | Lufttemperaturknoten |
| Kühldecke (bzw. Heiz-Kühl-Decke) | Lufttemperaturknoten |
| Thermisch aktivierte Bauteile | Masseknoten |