

Messen, Steuern, Regeln für Gebäude im Passivhaus-Standard

Mit einem Vorwort von Assoz. Prof. Dr. Rainer Pfluger

Inhaltsverzeichnis

1. Das Passivhaus und seine besonderen Eigenschaften	1
2. Der thermische Zustand eines Gebäudes	7
2.1. Bestimmung der Kerntemperatur durch Messung . . .	7
2.2. Bestimmung der Kerntemperatur durch Berechnung über ein thermisches Modell	8
2.3. Annäherung der Kerntemperatur durch Berechnung über eine Faltung	12
2.4. Aufbereitung der Kerntemperatur zum thermischen Zustand	13
2.5. Vom thermischen Zustand zum saisonalen Betriebsmodus	14
3. Regelungsaufgaben	17
3.1. Regelungsaufgaben der Lüftungssysteme	17
3.1.1. Volumenstrombalance	17
3.1.2. Wärmerückgewinnung	18
3.1.3. Frostschutz der Wärmeübertrager	21
3.1.4. Intermittierender Betrieb	22
3.1.5. Lufterhitzer	22
3.2. Regelungsaufgaben der Heizungssysteme	23
3.2.1. Freigabe des Heizungssystems	23
3.2.2. Absenkbetrieb	23
3.2.3. Leistungsanpassung des Heizungssystems . . .	24
3.2.4. Flächenheizungen	25
3.2.5. Wärmepumpen	27
3.3. Regelungsaufgaben der Systeme zur Wärmeabfuhr . .	28
3.3.1. Auskühlung der Speichermassen durch Nachtlüftung	28

3.3.2. Wärmeabfuhr durch aktive Kühlung	29
3.3.3. IT-Kühlung	29
3.4. Regelungsaufgaben der Sonnenschutzsysteme	30
4. Energieeffizienz der Gebäudeautomationssysteme	33
5. Betriebsüberwachung	37
5.1. Nutzerkomfort	38
5.2. Energieverbrauch	39
6. Literaturempfehlungen	43
7. Formalia	45
7.1. Impressum	45
7.2. Haftungsausschluss	45
A. Berechnung des thermischen Zustandes	47
B. Regelung der Wärmerückgewinnung, bevorzugte Variante	51
C. Regelung der Wärmerückgewinnung, alternative Variante	53
D. Regelung der Vorlauftemperatur	55
E. Steuerung einer asymmetrischen Wärmepumpenkaskade	57

Danksagung

ACHIEVE ZEB wurde ermöglicht durch finanzielle Unterstützung im Rahmen des LIFE Programms der EUROPÄISCHEN UNION unter der Nummer 101167494.



"Funded by the EUROPEAN UNION. Views and opinions expressed are, however, those of the author(s) only and not necessarily reflect those of the EUROPEAN UNION or CINEA.

Neither the EUROPEAN UNION nor the granting authority can be held responsible for them."

Motivation

Hoch energieeffiziente Gebäude im PASSIVHAUS-Standard und entsprechende ENERPHIT-Sanierungen gewinnen langsam, aber stetig an Verbreitung. Insbesondere langfristig orientierte Bauherren, wie etwa Kommunen, sehen die Vorteile von Kostensicherheit, attraktiven Lebenszykluskosten und großer Resilienz im Krisenfall. Eine angemessene Antwort auf die Herausforderungen der fortschreitenden globalen Erhitzung und der so genannten Energiewende formuliert die Bauweise ohnehin.

Der Autor konnte eine größere Zahl solcher Bauprojekte in unterschiedlichen Rollen begleiten; die Planung beratend begleitend, als Zertifizierer, bei Inbetriebnahme und Betriebsoptimierung- nicht selten auch für ein mehrjähriges Monitoring. Einige wiederholte Beobachtungen gaben zuerst den Anlass geeignete Automationskonzepte im Rahmen der 59. Sitzung des ARBEITSKREISES KOSTENGÜNSTIGE PASSIVHÄUSER näher zu untersuchen. Auch aus der 45. und der 52. konnten wichtige Anregungen übernommen werden. Für die freundliche Unterstützung durch das LAND HESSEN sei auch hier herzlicher Dank ausgesprochen. Der im Nachgang erschienene [Protokollband](#) behält seine Gültigkeit und sei zur vertiefenden Lektüre empfohlen. Dieser Text möchte die wesentlichen Punkte weiterentwickeln und für die Praxis zusammenstellen.

Zudem konnten, auf den Erkenntnissen aufbauend, weitere wertvolle Praxiserfahrungen gewonnen werden, die zeigen, dass eine robuste Funktion, bei planungsgemäßer Energieeffizienz, dann leicht erreicht werden kann, wenn von Anfang an geeignete Regelungskonzepte verfolgt und umgesetzt werden. Allzu oft wurden allerdings suboptimale

Verhältnisse angetroffen. Im Nachhinein und bei laufendem Betrieb ist es dann herausfordernd, Konzepte grundlegend zu ändern, Automationsstationen neu zu programmieren, zu testen etc.

Dieser Text möchte daher einen Überblick über die Eigenschaften hoch energieeffizienter Gebäude geben und die daraus resultierenden grundlegenden Probleme herkömmlicher Ansätze aufzeigen. Zugleich soll ein konstruktiver Vorschlag zu einer geeigneteren Alternative dargelegt werden.

Dabei ist das letzte Wort sicherlich noch nicht gesprochen. Rückmeldungen und Verbesserungsvorschläge werden gerne entgegengenommen.

Wenn der vorliegende Text einen Beitrag zum besseren Verständnis und besserer Berücksichtigung der Charakteristika von hocheffizienten Gebäuden in der Gebäudeautomation leisten, dadurch negative Erfahrungen vermeiden helfen kann und fruchtbare Diskussionen anregt hat er seinen Zweck erfüllt.

Vorwort

In der EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD 2024, RL (EU) 2024/1275) wird das NULLEMISSIONSGEBÄUDE (ZEB – zero-emission building) als künftiger Baustandard definiert, dieser löst das NIEDRIGSTENERGIEGEBÄUDE (NZEB – nearly zero-energy building) ab. Ziel der aktuellen EPBD ist, dass bis 2050 der gesamte Gebäudebestand den ZEB-Standard erfüllt (Art. 9 Abs. 2).

Im Neubau bildet heute der weltweit eingeführte PASSIVHAUS-Standard die Grundlage und wurde bereits in praktisch allen Gebäudekategorien (Wohn- und Nichtwohnbauten) erfolgreich umgesetzt. Für die Bestandsmodernisierung hat sich der ENERPHIT-Standard bewährt, welcher ebenfalls für alle Klimazonen und Gebäudekategorien ZEB-kompatibel für die Sanierung eingesetzt wird.

Weitgehend unabhängig von der Gebäudetechnik konnten diese hoch-effizienten Gebäude in Neubau und Sanierung in zahlreichen Monitoringprojekten die prognostizierten Einsparpotenziale unter Beweis stellen. Allein in Innsbruck wurden im Rahmen zahlreicher Forschungsprojekte (FFG, EU) sowohl Neubauten (z.B. LODENAREAL, CAMPAGENEAREAL) als auch Bestandssanierungen (SINFONIA, OUTPHIT, 3ENCULT) untersucht und wissenschaftlich begleitet. Im Innovationslabor INNERGY werden derzeit innovative Konzepte, Technologien und Lösungen für das Management von 100 Prozent erneuerbaren Energien im Bereich Wärme entwickelt und erprobt.

Damit ist der Grundstein für die EU-Ziele mit der gesamtheitlichen Umstellung auf den ZEB-Standard gelegt. Aufgrund der hohen Zeit-

konstanten hocheffizienter Gebäude sind sie darüber hinaus bestens als *energieflexible* Gebäude im regenerativen Energiesystem geeignet, weil der Zeitpunkt der Leistungseinbringung für die Konditionierung im Tagesverlauf weitgehend unerheblich ist. Auch saisonal erleichtert die geringe Heizlast dieser Gebäude deren regenerative Versorgung, weil die Jahresdauerline gegenüber konventionellen Gebäuden vergleichmäßig wird. Die Problematik aufwändiger saisonaler Energiespeicherung wird somit deutlich entschärft, was sich sowohl auf die Kosten als auch den Ressourcenaufwand für die Energiewende positiv auswirkt.

Hält man sich die genannten thermischen Eigenschaften hocheffizienter Gebäude vor Augen, so erkennt man, dass sie im Vergleich zu konventionellen Gebäuden eher „gutmütig“ und einfach regelbar im Energiesystem reagieren. Das ist prinzipiell auch der Fall, sollte aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass diese Gebäude thermisch eben etwas anders reagieren und damit auch angepasste bzw. neue Methoden in der MSR-Technik benötigen. Diese sind keineswegs aufwändiger oder teurer, unterscheiden sich aber in bestimmten Punkten von der jahrzehntealten herkömmlichen MSR. Wendet man letztere unreflektiert auch auf hocheffiziente Gebäude an, so können nicht alle Effizienzpotenziale und der optimale Komfort ausgeschöpft werden.

In dieser Broschüre sollen daher einfach, verständlich und in prägnanter Zusammenfassung Unterschiede und Besonderheiten der MSR hocheffizienter Gebäude herausgearbeitet und dokumentiert werden, um diese erfolgreich auf neue Projekte und Bestandsmodernisierungen anwenden zu können. Damit steht der Energiewende auf dem Weg zum Nullemissionsgebäude nichts mehr im Wege.

Assoz. Prof. Dr. Rainer Pfluger, Universität Innsbruck
Innsbruck, im Winter 2025/26

1. Das Passivhaus und seine besonderen Eigenschaften

Der PASSIVHAUS-Standard ist der einzige physikalisch umfassend definierte Gebäude-Energiestandard. Zudem liegen aus der Zeit seit der Einführung durch FEIST 1990 viele systematisch erhobene und umfassend dokumentierte Betriebserfahrungen vor.

Im Rahmen des PASSIVHAUS-Konzeptes werden keine neuartigen Baukomponenten eingesetzt, die ohnehin erforderlichen Bauteile aber konsequent und als Gesamtsystem optimiert. Den Schwerpunkt bilden, wie die Finger einer Hand, fünf Aspekte:

1. Hochwertige Wärmedämmung. Im kühl-gemäßigten Klima Mitteleuropas typischerweise z.B. 24 cm umlaufend um das gesamte Gebäude.
2. Wärmebrückenfreie Konstruktion. Alle Dämmschichten gehen lückenlos und ohne Ebenenversprung ineinander über. Durchdringungen werden vermieden oder durch optimierte Konstruktionen in ihrer Wirkung minimiert.
3. PASSIVHAUS-Fenster. Durch wärmedämmende Rahmenkonstruktionen, Dreifach-Wärmeschutzverglasung und sorgfältig geplante Anschlussdetails sind die Wärmeverluste minimiert, in günstigen Fällen können die winterlichen Solargewinne die Transmissions-Wärmeverluste übersteigen. Durch den geringen Wärmeverlust bleiben die inneren Oberflächentemperaturen hoch und es wird keine Heizfläche zur Sicherung des thermischen Komforts benötigt.
4. Eine hochwertig luftdicht ausgeführte Gebäudehülle verhindert das Entweichen warmer Luft, Zugerscheinungen durch Eindringen kalter Luft, feuchtebedingte Bauschäden durch Kondensation in Bauteilen und stellt die zielgerichtete Funktion von Lüftungssystemen sicher.
5. Ein Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung (WRG) gewährleistet die hygienische Lufterneuerung, wobei in der kalten Jahreszeit die Wärme im Gebäudeinneren zurückgehalten wird.

Das unter konsequenter Berücksichtigung der fünf genannten Eigenschaften gebildete thermische System weist einen sehr geringen Energiebedarf für Heizen und Kühlen auf; Auch kann der Energiebedarf mit geringer Leistung gedeckt werden,

1. Das Passivhaus und seine besonderen Eigenschaften

was durch eine entsprechend kleine Dimensionierung der gebäudetechnischen Systeme ökonomische Vorteile realisierbar macht und das Versorgungsnetz vor Lastspitzen bewahrt.

Für die Regelung der Systeme ist es bedeutsam, dass das thermische System des Gebäudes durch einen hohen thermischen Widerstand der Gebäudehülle und eine darin eingeschlossene erhebliche Wärmekapazität charakterisiert ist. Es entspricht in erster Näherung einem linearen zeitinvarianten System erster Ordnung mit einer Zeitkonstante von üblicherweise fünf bis fünfzehn Tagen. Bei Einwirkung der auf geringe Lasten ausgelegten Gebäudetechnik verhält sich ein solches System also träge und weist somit ein gutmütiges Regelverhalten auf. Zugleich zeigt sich ein ausgeprägtes Tiefpass-Verhalten, indem kurzzeitige Anregungen durch Wetter oder Nutzung keine wesentliche Veränderung des Systemzustandes bewirken. So lange die Lüftung mit Wärmerückgewinnung wie vorgesehen arbeitet und Fenster nicht exzessiv geöffnet werden, kann der thermische Widerstand der Hüllenbauteile praktisch als konstant angesehen werden und der Systemzustand bildet sich in der Temperatur der Wärmekapazität ab.

Der größte Teil der Wärmeverluste eines PASSIVHAUS-Gebäudes wird durch *freie Wärme* gedeckt. Diese setzt sich aus passiv-solaren Wärmegevinnen über die Fenster und der Wärmeabgabe von Geräten, Beleuchtung und Nutzenden zusammen. Der genaue Betrag ist bei jedem Gebäude etwas verschieden, es kann als Faustregel mit einem Anteil von $\frac{2}{3}$ gerechnet werden; Abbildung 1.1 zeigt beispielhaft die Energiebilanz-Grafik für ein Verwaltungsgebäude aus der Berechnung mit dem PASSIVHAUS-PROJEKTIERUNGS-PAKTET (PHPP). Die nutzungsbedingten *inneren Wärmequellen* belaufen sich in Wohngebäuden, Büros, Schulen und dgl. dabei im Tagesmittel auf nicht mehr als $2...4 \frac{W}{m^2}$.

Aus dem enorm hohen Anteil der freien Wärme wird deutlich, dass ein besonders sorgfältiger Umgang mit Wärme aus solarer Einstrahlung und der Wärmeabgabe von Geräten und Menschen im Rahmen des PASSIVHAUS-Konzeptes von entscheidender Bedeutung ist. Keinesfalls handelt es sich hier um eine randständige *Störgröße*.

Dies verlangt während der kalten Jahreszeit, dass Raumtemperaturen innerhalb eines Komfortbandes (typisch $20...23,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) fluktuieren dürfen, ohne dass etwa die Wärmerückgewinnung der Lüftung reduziert oder gar gekühlt wird. Während die alleinige Aufgabe des Heizsystems darin zu sehen ist, eine untere Grenze der Raumtemperatur zu garantieren, können *und müssen* die Raumtemperaturen durch solare Einstrahlung oder nutzungsbedingte innere Gewinne zeitweilig ansteigen, um Wärme für die spätere Nutzung an die speichernden Gebäudemassen übertragen zu können. Regelungskonzepte, die eine *konstante* Raumtemperatur zum Ziel haben sind für Gebäude im PASSIVHAUS-Standard somit prinzipiell ungeeignet.

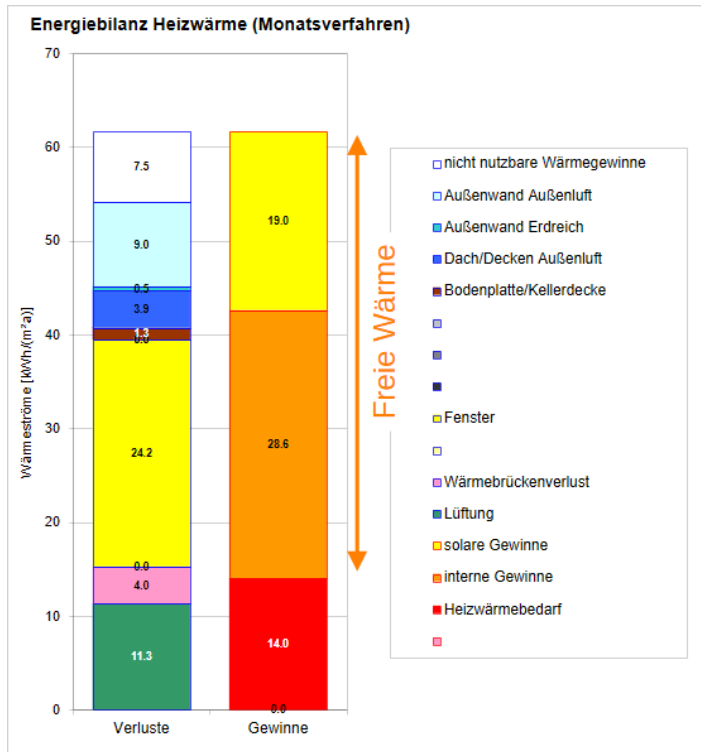


Abbildung 1.1.: Energiebilanz eines Verwaltungsgebäudes im PASSIVHAUS-Standard. Deutlich erkennbar ist der entscheidende Beitrag aus freier Wärme.

1. Das Passivhaus und seine besonderen Eigenschaften

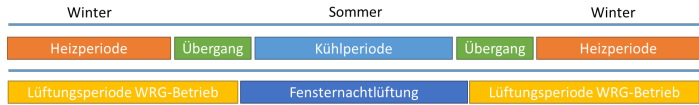


Abbildung 1.2.: Schematische Darstellung der saisonalen Betriebszustände

Durch das ausgeglichene Strahlungsklima im Raum, minimale Strahlungstemperatur-Asymmetrie und Luftgeschwindigkeit wird auch so ein hervorragender thermischer Komfort im Sinne der Kategorie A nach ISO 7730 erreicht.

Während der warmen Jahreszeit muss die Raumtemperatur durch Wärmeentzug, etwa durch Nachtlüftung oder Kühlung, abgesenkt werden können um die Speichermassen zur Pufferung der Wärmelasten des Tages nutzen zu können. Für übliche Fälle sind hier $20 \dots 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ als zulässige Spanne anzusehen.

Durch die große Zeitkonstante einerseits und die herausragende Bedeutung der freien Wärme andererseits besteht zumeist keine brauchbare Korrelation der Regelaufgaben zur Außentemperatur (ϑ_{AU}). Die herkömmlichen Ansätze zur Steuerung und Regelung von gebäudetechnischen Systemen nach der Außentemperatur geben in Passivhäusern daher Anlass zu vielfältigen Problemen und erweisen sich als wenig hilfreich.

Zudem bestehen wichtige saisonale Unterschiede:

Während im kurzen Kernwinter ein Zusatzbeitrag von aktiv eingebrachter Heizwärme erforderlich ist, kann während der längeren Übergangszeiten allein der sachgerechte Umgang mit der anfallenden freien Wärme alle Wärmeverluste decken. Die Heizperiode fällt also wesentlich kürzer aus als in konventionellen Gebäuden. Hierfür beginnt die Betriebszeit der Lüftung mit Wärmerückgewinnung *vor* der Heizzeit und endet *nach* der Heizzeit, wie die Abbildung 1.2 veranschaulicht.

Mit Eintritt der warmen Jahreszeit wird dann ein Punkt erreicht, ab dem weiterer Wärmeeintrag nicht länger vorteilhaft ist.

Im Sommer muss, wie in allen Gebäuden, oftmals überschüssige Wärme abgeführt werden.

Der Übergang von der Heizperiode zur Kühlperiode ist durch die thermische Trägheit des Gebäudes niemals übergangslos, ein rascher Wechsel zwischen beiden

Fällen muss somit regelungstechnisch nicht bewältigt werden. Auch ein erhöhter Energieverbrauch durch rasche Wechsel zwischen Heizen und Kühlen muss nicht befürchtet werden, wenn eine sachgerechte Regelung umgesetzt wird.

Ein für Gebäude im PASSIVHAUS-Standard geeignetes Regelungskonzept muss auf diese unterschiedlichen Anforderungen mit einer entsprechenden saisonalen Anpassung der Regelung reagieren.

Eine weitere folgenreiche Eigenschaft ergibt sich aus der guten Wärmedämmung der Außenbauteile. Die Wärmeverluste sind hier derart gering, dass sie bei minimaler Temperaturdifferenz bereits allein auf dem Weg der Wärmestrahlung ausgeglichen werden. Eine kleine Überschlagsrechnung mag das verdeutlichen:

Eine Außenwand mit Wärmedurchgangskoeffizient $U = 0,15 \frac{W}{m^2 K}$ gibt stationär bei 20 K Temperaturdifferenz eine Wärmeleistung von $3 \frac{W}{m^2}$ ab. Bei Raumtemperatur werden aber bereits gut $5 \frac{W}{m^2 K}$ zwischen den Innenoberflächen allein durch Wärmestrahlung übertragen; In der Folge unterscheiden sich die verschiedenen Umfassungsflächen eines Raumes in einem Passivhaus-Gebäude in ihrer Oberflächentemperatur kaum. Man kann auch von einem 'thermischen Kurzschluss' sprechen.

Art und Ort, aber auch der genaue Zeitpunkt eines Wärmeeintrags sind hierdurch nachrangig: Die Wärme des durch Solarstrahlung erwärmten Fußbodens verteilt sich in kurzer Zeit ebenso gleichmäßig wie etwa die Wärme einer Decke im Falle von Betonkerntemperierung oder erwärmter Zuluft, die über Weitwurfdüsen unter Nutzung des COANDÄ-Effektes eingebracht wird. Eine *Winterkompensation*, d.h. eine Erhöhung der Raumtemperatur bei sehr geringen Außentemperaturen, ist nicht erforderlich und würde nur den Heizwärmeverbrauch unnötig vergrößern.

Das sehr ausgeglichene Strahlungsklima begünstigt hohen thermischen Komfort und macht gleichzeitig deutlich, wie stark die Verhältnisse im Raum von der Temperatur der umliegenden thermischen Massen abhängen. In der Kenntnis dieser Temperatur liegt der Schlüssel für ein angepasstes Regelungskonzept.

Aus der vorstehenden Beschreibung wird ebenfalls klar, dass es sich bei einem PASSIVHAUS-Gebäude um ein thermisches Gesamtsystem handelt, das in seiner Funktion auf übliche Gewerkeabgrenzungen der Herstellungphase keine Rücksicht nimmt. Beispielsweise ist eine jahreszeitlich angepasste Betriebsweise der Sonnenschutzsysteme nur unter Einbezug der Innentemperaturen möglich. Eine einheitliche, gewerkeübergreifende und herstellerneutrale Gebäudeautomation wird deshalb empfohlen.

2. Der thermische Zustand eines Gebäudes

Der thermische Zustand (thZ) eines Gebäudes im PASSIVHAUS-Standard entspricht der Temperatur seiner inneren Wärmekapazität. Letztere ist zumeist wesentlich an die tragende Gebäudestruktur gebunden, wenngleich Ausbauteile einen nicht vernachlässigbaren Anteil stellen.

Die tiefen Schichten massiver Bauteile nehmen nur geringfügig an tagesperiodischen Temperaturschwankungen teil. Sie zeigen dafür den längerfristigen Trend umso besser an: Die Gesamtwirkung aller Wärmegewinne und -verluste spiegelt sich hier wider. Die Kerntemperatur massiver Bauteile ist daher ein geeignetes Maß für den Ladezustand der thermischen Kapazität und damit für den thermischen Zustand eines Gebäudes. Der thermische Zustand wird in einer Anzahl ausgewählter Führungsräume bestimmt.

2.1. Bestimmung der Kerntemperatur durch Messung

Mit hochwertigen Thermometern ¹ kann die Kerntemperatur massiver Bauteile in Bohrlöchern unmittelbar gemessen werden. Praktisch wäre dabei ein an den Fühlerdurchmesser angepasster Durchmesser des Bohrlochs zu beachten, die mechanische Sicherung der Lage des Fühlers am Grund der Bohrung und ein luftdichter Verschluss an der Austrittsstelle der Fühlerleitung. Eine thermische Beeinflussung der Messstelle durch eine durchgehende metallene Fühlerhülle oder übermäßig große Querschnitte der Anschlussleitungen ist zu vermeiden. Unter diesen Voraussetzungen ist eine Einbettung in Wärmeleitpaste oder dergleichen unnötig. Die Bohrtiefe beträgt 125 mm.

Dieses Vorgehen wurde in einem gut dokumentierten Schulprojekt ² von KUCKELKORN angewendet und hat sich dort bewährt; Die Messwerte einzelner Räume wurden untereinander gemittelt und zudem einer gleitenden Mittelwertbildung über

¹Auflösung 0,01 K, Messunsicherheit der gesamten Messkette $\leq \pm 0,3$ K

²[DBU-Abschlussbericht-AZ-26170_02.pdf](#)

2. Der thermische Zustand eines Gebäudes

eine Tagesperiode unterworfen. Der Rechenaufwand zur Verarbeitung der Messwerte ist hierdurch nur gering; Der Ansatz erfordert allerdings gesonderte Messtechnik und die damit verbundenen Kosten für Herstellung, Betrieb und Wartung.

2.2. Bestimmung der Kerntemperatur durch Berechnung über ein thermisches Modell

Sind Raumtemperaturen fortlaufend bekannt, kann für übliche Gebäude mit Tragwerk aus Stahlbeton jeweils eine entsprechende Bauteil-Kerntemperatur mit hinreichender Genauigkeit auch rechnerisch bestimmt werden, ohne dass erhebliche Kosten entstehen. Bei Gebäuden mit kontinuierlichem Lüftungsbetrieb, also insbesondere Wohngebäuden, kann es nach Abwägung im Einzelfall auch möglich sein die Ablufttemperatur als Repräsentation der mittleren Gebäudetemperatur in den Prozess einzuspeisen. Das Vorgehen soll im Folgenden näher ausgeführt werden.

Zunächst sollte der Wert der Raumtemperatur mit ausreichender Auflösung von $0,01\text{ K}$ vorliegen, um Rundungseffekte im Rechengang gering zu halten. Vorzugsweise sollte der Wert zudem mit geringer Messunsicherheit behaftet sein- die Gesamtunsicherheit der gesamten Messkette sollte $\pm 0,3\text{ K}$ nicht übersteigen.

Dies liegt jenseits der in der Gebäudeautomation derzeit üblichen $\pm 0,5...1\text{ K}$.

³ Da zuverlässige Raumtemperaturen zunehmend auch für die Betriebsdatenauswertung bzw. ein technisches Monitoring benötigt werden, ist es wünschenswert, dass die Standards für Temperaturmessungen in der Gebäudeautomation verbessert werden. Zumindest sollten Vierleiter-Platin-Temperaturfühler Klasse AA / DIN EN 60751:2009-05 zum Einsatz kommen. Zudem sollten Automationsstationen eine *rationometrische* Temperaturmessung für Widerstandsthermometer mit mehr als 14-bit Digitalisierungstiefe umfassen. ⁴ Alternativ können voll integrierte elektronische Temperatursensoren unmittelbar ein hochwertig digitalisiertes Messergebnis mit geringer Messunsicherheit zur Verfügung stellen. Sie sind bei einer Messunsicherheit um $\pm 0,2\text{ K}$ heute für ca. 1 EUR erhältlich. Hinzu kommen dann allerdings die Kosten für einen Mikroprozessor und die Feldbus-Anbindung.

³z.B. ergeben sich für Zweileiter-Ni1000-Widerstandsthermometer mit nur näherungsweise kalibriertem Leitungswiderstand und den Digitalisierungstoleranzen einer üblichen Automationsstation ca. $\pm 0,7\text{ K}$

⁴Ein Produktbeispiel für eine handelsübliche derartige Temperaturmessung wäre etwa das Modbus-Modul SENECA Z-4RTD2-SI auf Basis des AD7124 Bausteins

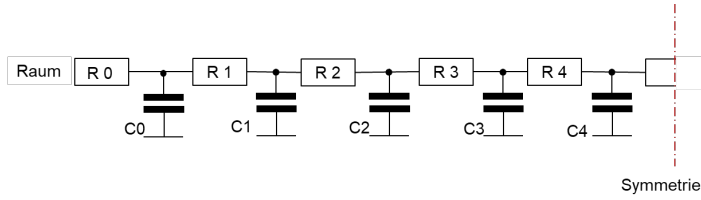


Abbildung 2.1.: Elektrisches Analogiemodell eines Bauteils in fünf Schichten

Die gemessene Raumtemperatur wird in das thermische Modell eines massiven Bauteils aus Beton eingespeist. Dieses ist nach BEUKEN als elektrische Analogie aus Widerständen und Kapazitäten in fünf Schichten formuliert. Die Abbildung 2.1 zeigt das Modell schematisch.

Die Schichtdicke zur Diskretisierung des Betonbauteils liegt bei 25 mm , an der tiefsten Schicht wird eine thermische Symmetrie bzw. ein adiabater Anschluss angenommen. Somit wird die bei der Messung in einem Bohrloch durch die halbe Bauteilstärke bestehende Situation simuliert.

Wenn L_i die Leitwerte der Schichten, t_r die Raumtemperatur, t_i die Temperatur der jeweiligen Schicht, C_i die Wärmekapazitäten der Schichten und q_i die Wärmeströme an den Schichtgrenzen beschreiben sowie DT den Zeitschritt, kann der Kernalgorithmus des Modells einfach formuliert werden als:

2. Der thermische Zustand eines Gebäudes

$$q_1 = L_0 \cdot (t_r - t_1) + L_1 \cdot (t_2 - t_1)$$

$$q_2 = L_1 \cdot (t_1 - t_2) + L_2 \cdot (t_3 - t_2)$$

$$q_3 = L_2 \cdot (t_2 - t_3) + L_3 \cdot (t_4 - t_3)$$

$$q_4 = L_3 \cdot (t_3 - t_4) + L_4 \cdot (t_5 - t_4)$$

$$q_5 = L_4 \cdot (t_4 - t_5)$$

$$t_1 = t_1 + \left(\frac{q_1}{C_1} \cdot DT \right)$$

$$t_2 = t_2 + \left(\frac{q_2}{C_2} \cdot DT \right)$$

$$t_3 = t_3 + \left(\frac{q_3}{C_3} \cdot DT \right)$$

$$t_4 = t_4 + \left(\frac{q_4}{C_4} \cdot DT \right)$$

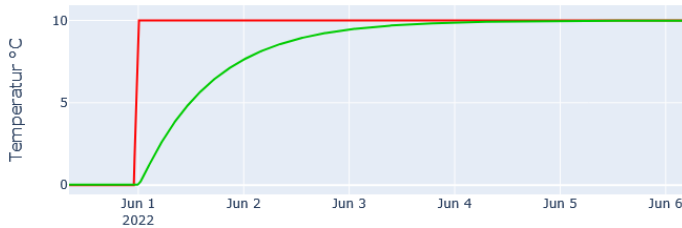
$$t_5 = t_5 + \left(\frac{q_5}{C_5} \cdot DT \right)$$

Die Temperatur t_5 stellt dann die gewünschte Kerntemperatur dar.

Das Modell wird mit einer Zeitschrittweite von einer Minute durchlaufen ($DT = 60 \text{ sec}$); Längere Intervalle führen zu numerischer Instabilität bei dem gewählten einfachen Vorwärtsdifferenz-Ansatz. Es ist aber unproblematisch, das Modell mehrfach hintereinander mit demselben Eingangswert zu durchlaufen, also etwa alle 10 Minuten einen Messwert zur Verfügung zu stellen und das Modell mit diesem Wert zehnmal in einer Schleife zu iterieren, bei Halbstunden-Werten entsprechend 30 mal. Anhang A gibt ein Code-Beispiel.

Das Modell ist auf 1 m^2 normiert und verwendet typische Materialkennwerte für Beton: Rohdichte $\rho = 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, spezifische Wärmekapazität $c = 1080 \frac{\text{Ws}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ und Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 2,1 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$. Eine Sprungantwort des Modells zeigt Abbildung 2.2; Die Zeitkonstante beträgt ca. 17 Stunden.

Bei der Inbetriebnahme muss das Modell mit einer Anfangstemperatur initialisiert werden; Es ist ausreichend, die Temperatur für alle Knoten des Modells gleich zu wählen. Bei der erstmaligen Inbetriebnahme ist jedoch kein Startwert bekannt. Zur Festlegung des Temperaturwertes gibt es verschiedene Möglichkeiten, die hier in aufsteigender Komplexität aufgeführt werden:



Abbildungung 2.2.: Sprungantwort des thermischen Modells eines Betonbauteils (grün). Zeitkonstante $\tau \approx 17 \text{ h}$

1. Initialisierung mit einem festen Wert im neutralen Bereich, z.B. $22,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Der Vorteil der Einfachheit steht hier dem Nachteil gegenüber, dass, je nach tatsächlicher thermischer Situation des Raumes, eine Einschwingzeit des Modells von bis zu 10 Tagen auftreten kann.
2. Verwendung des ersten Messwertes zur Initialisierung des Modells. Sofern der betreffende Raum thermisch weitgehend im Gleichgewicht ist, das heißt in dem fraglichen Augenblick keine Spitze bei anfallender freier Wärme und auch keine kurzzeitige Auskühlung (etwa aus Fensteröffnung) vorliegt, kann dies einen brauchbaren Startwert liefern, der eine entsprechend verkürzte Einschwingzeit im Bereich von einigen Tagen zur Folge hat.
3. Bestimmung eines Startwertes durch Aggregation der Messwerte während eines Vorlaufzeitraumes von 24 h . Sofern der Raum keinen extremen Fluktuationen ausgesetzt ist, kann ein solcher Tageswert eine sehr gute Basis für die Initialisierung des Modells liefern, die Einschwingzeit verkürzt sich hier recht zuverlässig auf etwa einen Tag.

Die Aggregation selbst kann als arithmetischer Mittelwert implementiert werden, was dann ein großes Speicher-Array für die Einzelwerte erfordert, oder, auf eingeschränkter Hardware, auch über eine Faltung nach der Art $t_{m,neu} = k \cdot t + (1 - k) \cdot t_{m,alt}$, wobei sich k als Kehrwert aus der Anzahl der an einem Tag verfügbaren Messwerte ergibt. Bei 10-minütigen Werten ergeben sich dann 144 Einzelwerte je Tag, entsprechend $k = \frac{1}{144}$ oder $0.0069\bar{4}$.

Um beim Neustart des Systems nach Abschaltung oder Stromausfall diese Einschwingzeiten zu vermeiden und den Betrieb praktisch nahtlos fortzuführen, ist es zielführend, die jeweilige Kerntemperatur nichtflüchtig zu speichern. Sie kann dann beim Neustart zur Initialisierung herangezogen werden. Da sich die Kerntemperatur sehr langsam ändert ist ein solches *Backup* in der Regel einmal am Tag

2. Der thermische Zustand eines Gebäudes

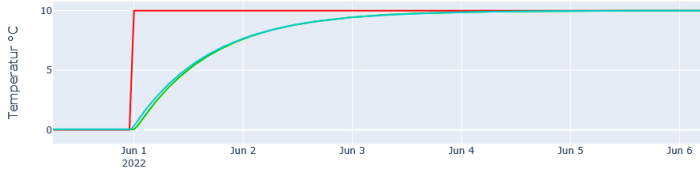


Abbildung 2.3.: Sprungantwort des thermischen Modells eines Betonbauteils (grün) und Ergebnis einer Faltung über die Zeitkonstante von 17 h (hellblau) im Vergleich.

ausreichend, kann aber auch häufiger erfolgen. Aus demselben Grund sind Ausfallzeiten bis zu einem Tag nahezu nahtlos überbrückbar. Erst bei längerem Ausfall können erneut relevante Einschwingzeiten auftreten.

2.3. Annäherung der Kerntemperatur durch Berechnung über eine Faltung

Eine besonders einfach umzusetzende Näherungslösung zur Bestimmung der Kerntemperatur kann durch eine Faltung der Messwerte über eine Periode erreicht werden, die der thermischen Zeitkonstante des simulierten Betonbauteils von 17 h entspricht. (Vergleiche hierzu Abbildung 2.2.)

Diese Bedingung muss allerdings strikt eingehalten werden, damit die Ergebnisse jenen des zuvor vorgestellten thermischen Modells weitgehend entsprechen.

Der Berechnungsansatz über eine Faltung ist daher weniger robust und flexibel gegenüber Veränderungen in der Frequenz der Eingangswerte. Wenn möglich sollte daher die Berechnung über ein thermisches Modell bevorzugt werden.

Ist der Faktor der Faltung gut abgestimmt, kann das Systemverhalten mit geringer Abweichung wiedergegeben werden, wie Abbildung 2.3 zeigt.

Die Faltung erfolgt nach der Art $t_{Kern,neu} = k \cdot t + (1 - k) \cdot t_{Kern,alt}$, wobei sich k als Kehrwert aus der Anzahl der innerhalb der 17 h-Periode verfügbaren Messwerte ergibt.

2.4. Aufbereitung der Kerntemperatur zum thermischen Zustand

Bei 10-minütigen Werten (6 Werte je Stunde) ergeben sich somit $17 \cdot 6 = 102$ Einzelwerte innerhalb der Zeitkonstante von 17 h , entsprechend $k = \frac{1}{102}$ oder 0.009804.

Sollten Messwerte in jeder Minute zur Verfügung stehen gehen entsprechend $17 \cdot 60 = 1020$ Einzelwerte in die Faltung über die Zeitkonstante ein und $k = \frac{1}{1020}$ oder 0.0009804.

2.4. Aufbereitung der Kerntemperatur zum thermischen Zustand

Die Bauteil-Kerntemperatur weist noch geringe tagesperiodische Schwankungen in der Größenordnung von wenigen Zehntel Kelvin auf, gleichgültig ob sie durch Messung im Bohrloch oder durch eine Berechnung bestimmt wird. Wie die Abbildung 2.4 zeigt, ist diese Amplitude ist nicht groß, liegt aber bereits in der Größenordnung einer sinnvollen Hysterese beim Übergang zwischen den Betriebsmodi (vergl. Abschnitt 2.5). Es ist daher notwendig, die Kerntemperatur noch einer Glättung bzw. Tiefpass-Filterung über eine Tagesperiode zu unterwerfen. Wie zuvor ausgeführt, kann auch hier eine gleitende arithmetische Mittelwertbildung oder ein Faltungsansatz, im gleichen Sinne wie bei der Initialisierung beschrieben, angewendet werden.

Die geglättete Kerntemperatur repräsentiert den thermischen Zustand des Gebäudes, wie er für die weitere Regelung verwendet wird.

Stehen mehrere Raumtemperaturen zur Verfügung kann im einfachsten Fall das arithmetische Mittel der Messwerte zur Speisung *eines* thermischen Modells herangezogen und dadurch ein thermischer Zustand berechnet werden.

Wenn es die Leistungsfähigkeit der Hardware erlaubt ist es jedoch informativer, wenn der thermische Zustand für jeden Raum einzeln berechnet und ausgewiesen wird und eine Mittelwertbildung zu Regelungszwecken erst im Anschluss erfolgt. Für stark gegliederte große Gebäude oder solche mit sehr verschiedenen Nutzungen kann jeweils der thermische Zustand für einen Teilbereich bestimmt und zur Regelung herangezogen werden, ggfs. ist aber schon ein (gewichteter) Mittelwert für die Gesamtregelung ausreichend.

Raumtemperatur und thermischer Zustand sollten immer historisiert werden, um eine systematische Betriebsüberwachung zu ermöglichen.

2. Der thermische Zustand eines Gebäudes

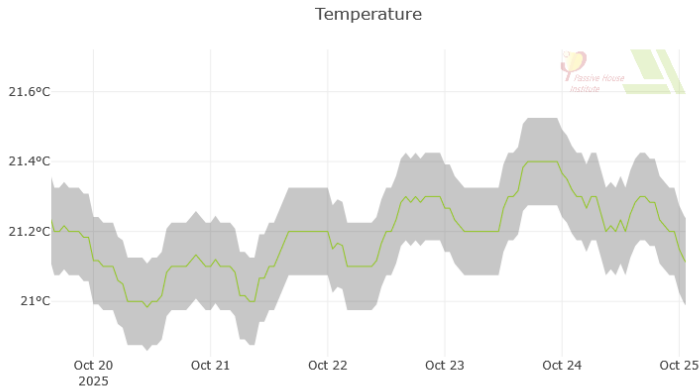


Abbildung 2.4.: Gemessene Kerntemperatur einer Betondecke

2.5. Vom thermischen Zustand zum saisonalen Betriebsmodus

Der thermische Zustand hat die Einheit einer Temperatur und schwankt im Jahresverlauf um 5...8 K. Dieser Betrag ist nicht sehr groß, daher muss die Auswertung mit einer hohen Auflösung erfolgen.

In dem genannten Schulprojekt wurden aus dem thermischen Zustand drei Betriebsmodi abgeleitet und mit Erfolg verwendet. Eine etwas feinere Differenzierung zeigte sich aber bereits dort als wünschenswert und wird auch hier empfohlen. Tabelle 2.1 stellt die empfohlenen Modi und die zugehörigen Schaltwerte des thermischen Zustands zusammen.

Für Gebäude mit üblicher Nutzungsart, wie etwa Wohnungen, Bildungs- und Verwaltungsgebäude, stellen diese Werte eine realistische Näherung dar und erlauben eine zufriedenstellende Gebäudefunktion. Der Bereich komfortabler Raumtemperaturen ist hier mit 20...25 °C unterstellt, hiervon sollte nur in begründeten Fällen abgewichen werden. Die Schaltwerte sollten im Rahmen der Betriebsoptimierung leicht editierbar sein um den Gegebenheiten des Einzelfalles Rechnung tragen zu können. Die Hysterese sollte nur in begründeten Ausnahmefällen größer als 0.1...0.2 K gewählt werden. Sie stellt sicher, dass auch im Grenzbereich zweier Betriebsmodi keine kurzfristig wechselnden Einstufungen ausgegeben werden.

2.5. Vom thermischen Zustand zum saisonalen Betriebsmodus

Modus	Thermischer Zustand ϑ_{thz} [$^{\circ}C$] (<i>Hysterese</i>)
0, Stützbetrieb (Ferien)	$\leq 17,2$ (17,4) Freigabe Heizung, Lüftung aus, Verschattung offen
1, Heizen	$\leq 20,4$ (20,6) Freigabe Heizung, WRG aktiv, Verschattung offen
2, Neutral kühl	$\geq 20,6$ Verschattung offen, WRG aktiv
3, Neutral warm	$\geq 22,5$ (22,3) Verschattung bei $\geq 150 \frac{W}{m^2}$ geschlossen, WRG bei $\vartheta_{AU} < \vartheta_{AB}$ aus
4, Passive Kühlung	$\geq 23,5$ (23,3) Nachtlüftung aktiv, Verschattung bei $\geq 150 \frac{W}{m^2}$ geschlossen, WRG bei $\vartheta_{AU} < \vartheta_{AB}$ aus
5, Aktive Kühlung	$\geq 24,5$ (24,4) Freigabe Kühlung, Verschattung bei $\geq 150 \frac{W}{m^2}$ geschlossen, WRG bei $\vartheta_{AU} < \vartheta_{AB}$ aus

Tabelle 2.1.: Betriebsmodi und beispielhafte Schwellwerte des thermischen Zustandes

2. Der thermische Zustand eines Gebäudes

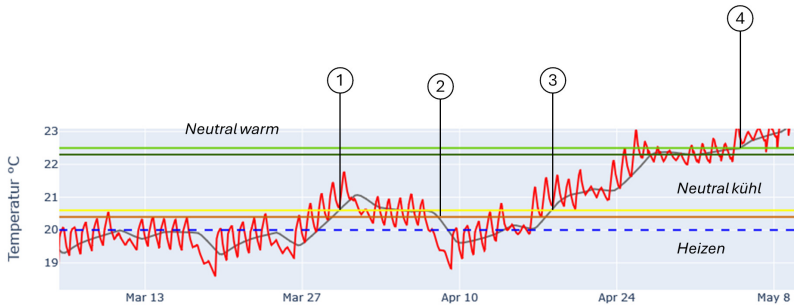


Abbildung 2.5.: Raumtemperatur (rot), thermischer Zustand (grau) und Schaltwerte der Betriebsmodi mit Hysterese (farbige horizontale Linien); Thermostateinstellung Raumtemperatur während der Nutzungszeit (blau, unterbrochen)

Abbildung 2.5 verdeutlicht vor dem Gang der Raumtemperatur (rot) die Entwicklung des thermischen Zustandes (grau), im Verhältnis zu den Schaltwerten für saisonale Betriebsmodi mit deren jeweiliger Hysterese. Das Beispiel entstammt einem Bürogebäude im PASSIVHAUS-Standard mit regelmäßigen Nutzungszeiten an 5 Werktagen, unterbrochen von zwei Tagen Wochenende. Diese Absenckphasen zeichnen sich deutlich ab, ein Stützbetrieb wird angesichts der Kürze der Unterbrechnungen aber noch nicht erforderlich.

Der Betriebsmodus 1, *Heizen* wird ende März zugunsten von 2, *Neutral kühl* verlassen (1), ein Kälteeinbruch lässt die Kapazität des Gebäudes jedoch auskühlen wodurch der Betriebsmodus 1, *Heizen* nochmals aktiviert wird (2). In der zweiten Aprilhälfte wird wieder 2, *Neutral kühl* erreicht (3). Etwa zwei Wochen später wechselt der Betriebsmodus anfang Mai zu 3, *Neutral warm* (4).

3. Regelungsaufgaben

Die Verfügbarkeit von Mess- und Rechenwerten, beispielsweise von Raumtemperaturen und thermischem Zustand für alle Bereiche der Gebäudeautomation, etwa die Sonnenschutz-Regelung, ist in jedem Fall sicherzustellen, damit ein saisonal angepasster Betrieb leicht und sicher erzielt werden kann. Innerhalb einer Gewerke-übergreifenden Automation ist dies in der Regel leicht zu gewährleisten. Wird ein Gateway zur Kommunikation zwischen separaten Systemen erforderlich, muss bei Ausfall des Gerätes eine geplante Notfunktion greifen um undefinierte Betriebszustände zu vermeiden.

Unter dieser Voraussetzung kann der thermische Zustand für eine Anzahl von Einzelaufgaben eine Regelung mit Bezug auf die Zielgröße ermöglichen. Diese und weitere, für das Gebäude im PASSIVHAUS-Standard bedeutende Aspekte sollen im Folgenden für wichtige Regelungsaufgaben kurz zusammengestellt werden.

3.1. Regelungsaufgaben der Lüftungssysteme

Die Lüftung mit Wärmerückgewinnung und deren saisonal angepasster Betrieb sind für die Funktion eines Passivhauses von **entscheidender** Bedeutung. Die damit verbundenen Regelungsaufgaben stehen daher bewusst an erster Stelle dieser Auflistung.

3.1.1. Volumenstrombalance

Dauerhaft balancierte Luftvolumenströme ermöglichen langfristig hohe Energieeinsparungen durch die Wärmerückgewinnung. Diese Frage ist vom thermischen Zustand des Gebäudes unabhängig, aber von so fundamentaler Bedeutung für eine befriedigende Gebäudefunktion, dass sie hier dennoch vorangestellt werden soll. Zentral ist die Balance am Durchtrittspunkt der Gebäudehülle, das ist zumeist auf der Außen- und Fortluftseite. Dabei darf die praktisch unvermeidliche Abweichung vom Idealzustand 10 % Disbalance nicht übersteigen. Aufgrund der ähnlichen Temperaturen der Luftströme stellt eine Volumenstrombalance eine für praktische Zwecke ausreichende Annäherung an die Massenstrombalance dar.

Im Geschosswohnungsbau sollte darüber hinaus auch auf die Balance innerhalb der einzelnen Wohneinheiten geachtet werden. Diese weisen untereinander keinen wirksamen Luftverbund auf und lokaler Zuluftüberschuss kann somit nicht über

3. Regelungsaufgaben

eine benachbarte Einheit mit Abluftüberschuss ausgeglichen werden, sondern führt zu Exfiltration über Leckagen in der Außenhülle. Feuchtebedingte Bauschäden und Komfortbeeinträchtigungen können die Folge sein.

Das Lüftungsgerät selbst muss, auf Basis einer geeigneten Messung, einen Konstant-Volumenstrom-Betrieb der Ventilatoren gewährleisten. Mit Hilfe einer Konfiguration, bei welcher der Abluftvolumenstrom dem Zuluftvolumenstrom nachgeführt wird, kann der balancierte Betrieb der Lüftungsanlage dann sichergestellt werden. Zur Betriebsüberwachung sind die Messwerte der Volumenströme stets einsehbar zu machen und zu historisieren.

Ein druckkonstanter Betrieb der Zuluft- und Abluft-Kanalstränge ist nicht hinreichend, da die nachgelagerten Volumenstrombegrenzer keine ausreichende Genauigkeit bieten und deren einzelne Abweichungen sich zudem addieren können.

3.1.2. Wärmerückgewinnung

Die Wärmerückgewinnung innerhalb der Lüftungsanlage mit einem effektiven Wärmebereitstellungsgrad $\eta_{eff} \geq 75\%$ ¹ stellt das zentrale Element des Wärmeschutzes im Bereich des Lüftungssystems dar und kann quasi als Teil der thermischen Gebäudehülle aufgefasst werden. Das PASSIVHAUS-Konzept geht davon aus, dass die Wärmerückgewinnung während der kalten Jahreszeit durchgängig und vollumfänglich wirksam ist. Dabei beginnt die Nutzung der Wärmerückgewinnung jahreszeitlich deutlich vor dem Eintritt der Heizperiode und endet lange nach Ende des Heizbetriebs.

Die Minderung der Wärmerückgewinnung durch Ansteuerung einer Bypassklappe bei Plattenwärmeübertragern, Drehzahlregelung bei Rotoren oder Verstellung der Zykluszeit bei Speicherblöcken, ist in einem PASSIVHAUS unter normalen Umständen ausdrücklich *keine* Regelungsfunktion zur Stabilisierung der Raumtemperatur, der Zuluft- oder Ablufttemperatur. Durch die große thermische Trägheit des PASSIVHAUSES werden auch keine flinken Regelstrecken dieser Art benötigt, im Übrigen gilt die Notwendigkeit fluktuierender Raumtemperaturen zur Ausnutzung der freien Wärme: Wird die Nutzung freier Wärme durch Abregelung der Wärmerückgewinnung fortlaufend gemindert hat dies erhebliche Auswirkungen auf den Energieverbrauch des Gebäudes.

¹Ein Überblick zu den Anforderungen an PASSIVHAUS-geeignete Lüftungssysteme findet sich in den [Zertifizierungskriterien](#)

Regelung der Wärmerückgewinnung nach dem thermischen Zustand des Gebäudes als bevorzugter Ansatz

Ist der thermische Zustand eines Gebäudes bekannt, können alle denkbaren Betriebszustände leicht in die erforderliche Regelanweisung für die Wärmerückgewinnung übersetzt werden.

So lange der thermische Zustand die Betriebsmodi 1, *Heizen* und 2, *Neutral kühl* anzeigt, bleibt die Wärmerückgewinnung bei 100 %. Beim Wechsel zu 3, *Neutral warm* kann auf die Wärmerückgewinnung aus energetischer Sicht komplett verzichtet werden, sie dient dann lediglich zur Absicherung einer Mindest-Zulufttemperatur von beispielsweise 16,5 °C, sofern die Witterung das erfordert.

Die planerisch-konstruktive Voraussetzung für einen solchen, an der Energiebilanz des Gebäudes orientierten Betrieb, ist eine zugfreie Zuluft einbringung auch bei leichter Untertemperatur, außerhalb des Aufenthaltsbereichs, also ein Mischlüftungskonzept. Quelllüftungskonzepte verhalten sich zumeist ungünstig und sollten vermieden werden. In PASSIVHAUS-Gebäuden kommt stets eine hochwertige Wärmerückgewinnung von effektiv ≥ 75 %, zumeist heute ≥ 80 % zum Einsatz. Die Differenz der Zulufttemperatur zur Raumlufttemperatur ist dadurch allein aufgrund der Wärmerückgewinnung regelmäßig nur gering, eine Nacherwärmung der Luft ist nicht erforderlich. Insbesondere bei dicht belegten Räumen (Klassenzimmer, Besprechungsräume) erfordert die Zuluftführung dennoch sorgfältige Planung.

Eine Nacherwärmung der Zuluft aus Komfortgründen kommt nur bei regenerativen Wärmeübertragern und sehr geringen Außentemperaturen in Frage und sollte ausschließlich dann erfolgen, wenn auch durch volle Wärmerückgewinnung die Mindest-Zulufttemperatur von 16,5 °C nicht mehr erreicht werden kann.

In der Regel wird die Zuluft zweckmäßig über Kopfhöhe eingeblasen und mittels COANDÁ-Effekt über die Deckenfläche verteilt. Dabei tritt eine Vermischung mit Raumluft und eine Erwärmung über den Kontakt mit der Deckenfläche ein. Damit die Luftgeschwindigkeit außerhalb des Aufenthaltsbereichs nahezu vollständig abgebaut wird, ist eine ausreichend lange Strecke erforderlich, etwa ein Schlitzauslass über die Raumbreite und eine freie Strömung entlang der Raumtiefe. In der Deckenuntersicht dürfen keine Stufen bestehen, Strömungshindernisse wie querstehende Leuchten und dergleichen sind zu vermeiden. Ein integraler Planungsansatz ist mithin erforderlich.

Alternativ kann Zuluft mit minimaler lokaler Geschwindigkeit über einen Textilschlauch oder ein gelochtes Rohr und damit über große Flächen verteilt eingebracht werden.

In üblichen Fällen kann von einer vollständigen Durchmischung der Raumluft ausgegangen werden ($\epsilon = 1$), es ist keine *Verdrängungslüftung* möglich

3. Regelungsaufgaben

oder erforderlich.²

Ob eine weitere Nacherwärmung der Zuluft zur thermostatisch geregelten Raumbeheizung bei Bedarf erfolgt, ist vom Heizungskonzept des Gebäudes abhängig. Sofern andere Wärmeübergabesysteme bestehen, sollten diese in der Regel prioritär verwendet werden, da sie zumeist geringere Vorlauftemperaturen erfordern. Das gilt insbesondere für Flächenheizungen und die Wärmebereitstellung durch Wärmepumpen.

Übersteigt die Außentemperatur während der warmen Jahreszeit (Betriebsmodi 3, *Neutral warm* und höher) die Raum- bzw. Ablufttemperatur, sollte die Wärmerückgewinnung wieder vollständig in Betrieb genommen werden um die Wärmelast aus Lüftungsbetrieb zu vermindern.

Die aus den beschriebenen Anforderungen folgende Logik für die Regelung der Wärmerückgewinnung ist in Anhang B beispielhaft dargestellt.

Regelung der Wärmerückgewinnung nach zentral messbaren Größen als Option einer Näherungslösung

Ist der thermische Zustand eines Gebäudes nicht bestimmbar, kann eine für alle Situationen ideale Regelung der Wärmerückgewinnung nicht mit Sicherheit erreicht werden. Sofern nur am Lüftungsgerät zentral messbare Größen als Eingangsgrößen für eine Regelung zur Verfügung stehen, kann eine näherungsweise für Gebäude im PASSIVHAUS-Standard geeignete Lösung nach der im Folgenden ausgeführten Weise realisiert werden.

1. Wenn die Ablufttemperatur $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht überschreitet *und* die gleitende 24-h Außentemperatur³ weniger als $16,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ beträgt, wird die Wärmerückgewinnung zu 100 % betrieben.
2. Entfällt eine der beiden Bedingungen, richtet sich die Regelung allein nach der Einhaltung einer minimalen Zulufttemperatur von $16,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
3. Übersteigt die Außentemperatur während der warmen Jahreszeit die Ablufttemperatur, wird die Wärmerückgewinnung wieder vollständig in Betrieb genommen.

²Rainer Pfluger: „Hocheffiziente Klassenraumlüftung für Passivhaus-Schulgebäude – Lessons learnt“, Protokollband, 26. IPHC, Wiesbaden, 2023

³Hier darf nicht die Außenlufttemperatur des intermittierend betriebenen Lüftungsgerätes verwendet werden, da diese nur zur Betriebszeit valide Werte liefert.

Alle genannten Temperaturwerte sollten zur Betriebsoptimierung bei Bedarf leicht einstellbar sein. Ein Code-Beispiel für die genannte Logik findet sich in [Anhang C](#).

3.1.3. Frostschutz der Wärmeübertrager

Die Frage des Vereisungsschutzes im Lüftungsgerät ist vom thermischen Zustand eines Gebäudes unabhängig. Sie ist bei regenerativ arbeitenden Systemen, z.B. Rotoren, im kühl-gemäßigten Klima Mitteleuropas auch zumeist vernachlässigbar. Für Plattenwärmeübertrager ohne Feuchteübertragung kann der Frostschutz-Energiebedarf jedoch relevant sein, insbesondere, wenn unzureichende Regelungen und Regelparameter zum Einsatz kommen. Daher wird auch diese Frage hier kurz berührt.

Für eine zielgerichtete Regelung ist zunächst einmal mehr die Messung der Gegebenheiten mit geringer Messunsicherheit unabdingbar, es gilt auch hier das längerfristige Ziel verbesserter Standards mit $\pm 0,3 \text{ K}$ Messunsicherheit für die gesamte Messkette.

Um ein schädliches Einfrieren des Wärmeübertragers zu vermeiden, wird zumeist eine Vorwärmung der Außenluft vorgesehen. Es liegt in der Natur der Sache, dass ein Einfrieren erst bei Außenlufttemperaturen unterhalb von $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ physikalisch möglich ist. Eine Vorheizung der Außenluft sollte zusätzlich auf die Grenztemperatur des jeweiligen Wärmeübertragers abgestimmt werden. Diese liegt üblicherweise bei $\vartheta_{\text{grenz}} \leq -3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, nur bei sehr hohen Wärmebereitstellungsgraden jenseits von 85 % etwas näher am Gefrierpunkt. Eine generelle Freigabe der Vorheizung ab einem solchen Grenzwert ist sinnvoll, um den Energieeinsatz minimal zu halten und die Auswirkungen von Fehlfunktionen in der nachgelagerten Frostschutzregelung zu begrenzen. Weitere Parameter, wie etwa die aktuelle Taupunkttemperatur der Abluft, können in die Regelung einfließen, sind aber mit den nicht vernachlässigbaren Messunsicherheiten der üblichen kapazitiven Feuchtefühler behaftet. Komplexere und langzeitstabilere Messtechnik, wie etwa die Messung über einen Taupunktspiegel, ist für den HLK-Bereich verfügbar und für größere Anlagen eine bedenkenswerte Option. Sofern die Daten eines solchen Sensors allein der Frostschutzregelung dienen, kann dessen Betrieb an die übergeordnete Freigabe des Frostschutzbetriebs gekoppelt und dadurch die technische Lebensdauer verlängert werden.

Seltener erfolgt der Vereisungsschutz über einen teilweisen Bypass auf der Zuluftseite, womit ein Überschuss warmer Abluft im Wärmeübertrager herbeigeführt, dabei aber die Gesamtbalance gewahrt wird. Eine entsprechende Nachwärmung der Zuluft wird in diesem Betriebszustand erforderlich um die mindest-Zulufttemperatur einzuhalten. Für die übergeordnete Freigabe gilt das zuvor Gesagte, die genaue Regelung der Außenluftbypassklappe ist im Übrigen hersteller-

3. Regelungsaufgaben

spezifisch.

Ungeeignet sind einseitige Volumenstromänderungen, die zu einer Disbalance im gesamten Lüftungssystem führen, etwa über die Drosselung des Zuluftventilators. Diese treiben die Heizlast des Gebäudes in die Höhe und führen zu erzwungener Infiltration kalter Außenluft. Sofern über die Nacherwärmung der Zuluft geheizt werden sollte, stünde in diesem Betriebszustand zudem ein erhöhter Wärmebedarf einer geminderten Kapazität zur Wärmeverteilung gegenüber.

3.1.4. Intermittierender Betrieb

In den meisten Nichtwohngebäuden wie Bildungsgebäuden oder Büros und Verwaltungen wird das Lüftungssystem intermittierend betrieben. Während der Stillstandsphase über Nacht akkumulierte Luftbelastungen werden im Zuge eines Vorspülbetriebes vor Betriebsbeginn entfernt. Dieser dauert üblicherweise eine Stunde und kann leicht über eine Zeitsteuerung eingerichtet werden.

Für einen dauerhaft hygienisch einwandfreien Betrieb des Lüftungssystems ist vor der abendlichen Abschaltung eine Routine zur Filtertrocknung vorzusehen. Dabei wird die Außenluftklappe verschlossen und trockene, gegebenenfalls zusätzlich erwärmte Innenluft über den Filter geführt. Nach der vollständigen Trocknung kann dann die Lüftungsanlage abgeschaltet werden.

Sofern das gewählte Lüftungsgerät keine internen Vorrichtungen zur entsprechenden Umsteuerung des Luftstroms für eine Filtertrocknung besitzt, muss dem planerisch durch Anordnung entsprechender Kanäle und Klappen Rechnung getragen werden.

3.1.5. Lufterhitzer

In PASSIVHAUS-Gebäuden kommt stets eine hochwertige Wärmerückgewinnung von heute zumeist $\geq 80\%$ zum Einsatz. Die Differenz der Zulufttemperatur zur Raumlufttemperatur ist dadurch allein aufgrund der Wärmerückgewinnung regelmäßig nur gering, eine Nacherwärmung der Luft in der Regel nicht erforderlich. Kosten, Druckverlust und Regelungsnotwendigkeiten eines Lufterhitzers können eingespart werden.

Der Betrieb eines Lufterhitzers wirkt sich oftmals sogar nachteilig aus, indem der -bezogen auf die Raumtemperatur- unregelmäßige Wärmeeintrag zu einer Überwärmung der Räume führt. Insbesondere in Räumen mit hoher Personenbelegung (Klassenzimmer, Besprechungsräume) wird im Nutzungszustand eine erhebliche Wärmeleistung durch die Körperwärme der Nutzenden selbst eingebracht, die gerade an klaren kalten Wintertagen noch durch beträchtliche Solargewinne ergänzt

werden kann.

Eine Nacherwärmung der Zuluft aus Komfortgründen kommt somit nur bei regenerativen Wärmeübertragern und sehr geringen Außentemperaturen in Frage. Ein Betrieb des Lufterhitzers sollte grundsätzlich nur dann freigegeben werden, wenn die Wärmerückgewinnung zu 100 % arbeitet und durch die Wärmerückgewinnung allein eine Mindest-Zulufttemperatur von $16,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht mehr erreicht werden kann. Die erforderliche Leistung und Jahresarbeit für diesen eng begrenzten Zweck sind sehr gering.

Erforderlich ist die Anordnung eines Lufterhitzers dann, wenn die Beheizung des Gebäudes mittels Zuluft erfolgen soll. Dies kann in PASSIVHAUS-Gebäuden andere Systeme zur Wärmeverteilung komplett ersetzen und in solchen Fällen eine besonders kostengünstige Lösung darstellen. Die Regelung erfolgt aber auch dann rein thermostatisch mit Bezug auf die Raumtemperatur.

3.2. Regelungsaufgaben der Heizungssysteme

3.2.1. Freigabe des Heizungssystems

Der thermische Zustand eines Gebäudes ist hervorragend geeignet um im Betriebsmodus 1, *Heizen* eine Freigabe des Heizsystems auszulösen und nach Überschreitung der vorgesehenen Hysterese diese Freigabe wieder aufzuheben. Der Betrieb der entsprechenden Anlagen kann so auf ein enges Zeitfenster eingeschränkt werden, in dem eine tatsächliche Wärmenachfrage wahrscheinlich ist. Vorteilhaft ist, dass auch späte Kälteeinbrüche oder unerwartete Nutzungsmuster im thermischen Zustand mit abgebildet werden, so dass es dann zu einer Re-Aktivierung z.B. im späten Frühjahr kommen kann, ohne dass irgendein Nutzereingriff erforderlich wäre. Aufgrund der thermischen Trägheit des PASSIVHAUSES kann -und sollte- außerhalb des Betriebsmodus 1, *Heizen* nach Möglichkeit eine vollständige Abschaltung des Heizungssystems erfolgen. Überraschende Wärmenachfrage ist nicht zu erwarten.

Die Regelung der Wärmeübergabe in den Räumen erfolgt thermostatisch. Herkömmliche Thermostate am Vorlauf können verwendet werden, Rücklauftemperaturbegrenzer (RTL) sind eine interessante Alternative.

3.2.2. Absenkbetrieb

Bei Wohnnutzung ist eine Nachtabenkung in PASSIVHAUS-Gebäuden aufgrund der großen thermischen Zeitkonstante nahezu unwirksam und kann im Regelbetrieb entfallen. In Einfamilienhäusern kann bei längerer Abwesenheit (Urlaub) die Einstellung einer verminderten Solltemperatur für eine Absenkung sorgen.

3. Regelungsaufgaben

In Nichtwohngebäuden sollte außerhalb der Betriebszeiten ein Modus 0, *Stützbetrieb* der Heizung eine minimale Innentemperatur bzw. thermischen Zustand von $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ sichern. Ein stärker ausgeprägter Absenkbetrieb kann zwar in einzelnen Situationen marginal größere Energieeinsparungen erzielen; Um eine ausreichend schnelle Wiederaufheizung zu gewährleisten ist dann aber eine unwirtschaftlich leistungsstarke Auslegung des Heizungssystems erforderlich.⁴

Üblicherweise ist mit einer Auskühlrate von $\leq 1\frac{\text{K}}{\text{d}}$ zu rechnen, wie auch die Abbildung 2.5 illustriert; Daher kommt der Stützbetrieb in der Regel erst bei längeren Betriebsunterbrechungen, wie langen Wochenenden oder Ferien, zum Tragen.

3.2.3. Leistungsanpassung des Heizungssystems

Eine herkömmliche Außentemperatur-geführte Steuerung der Heizungsvorlauftemperatur ist in Passivhäusern nicht sinnvoll, da freie Wärme erheblich zur Deckung der Wärmeverluste beiträgt und die Korrelation von Wärmebedarf und Außentemperatur sehr schwach ausgeprägt ist.

Deutlich zielführender und ebenso einfach ist eine Regelung der Systemtemperatur nach dem thermischen Zustand des Gebäudes. Dieser zeigt *per se* die Größenordnung einer möglichen Leistungsnachfrage an. Das Prinzip der temperaturabhängigen Steuerkurve kann dabei sinngemäß von der Außentemperatursteuerung übernommen werden, die Führungsgröße ist hier stattdessen der thermische Zustand. Die Charakteristik des Wärmeübergabesystems kann mit Heizkörperexponenten berücksichtigt werden, eine Anpassung über Steilheit (Faktor) und Parallelverschiebung (Summand) erlaubt eine einfache Nachjustierung zur Betriebsoptimierung. Der Auslegungsfall ist für Nichtwohngebäude bei der Wiederaufheizung des Gebäudes nach Stützbetrieb zu erwarten, also bei einem thermischen Zustand von $17\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bei Erreichen der Grenztemperatur für den Betriebsmodus 1, *Heizen* erreicht die Systemtemperatur ihr Minimum. Ein Code-Beispiel für Heizkennlinien-Regelung findet sich in Anhang D.

Eine Regelung nach der abgenommenen Leistung käme dem Ideal am Nächsten, ist aber weniger leicht umzusetzen. Je nach Größe und Komplexität des Gebäudes kann aber über eine Rücklauftemperaturregelung in Verbindung mit einer Einbindung des von der regelbaren Heizkreispumpe geförderten Massenstromes bereits

⁴Für Gebäude im PASSIVHAUS-Standard hat sich bei stationärem Betrieb eine Grenze der installierten Erzeugerleistung von $20\ldots 30\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ bewährt. Beispiele hierfür sind die [Leitlinien zum wirtschaftlichen Bauen der Stadt Frankfurt](#) und eine empirische Untersuchung aus der [BAHNSTADT in Heidelberg](#)

eine interessante Näherung erreicht werden. Der Einbau eines zentralen Wärmehälers ist für die Betriebsüberwachung wertvoll, er liefert zu geringen Kosten darüber hinaus fortlaufend Durchfluss, Vor- und Rücklauftemperatur, Spreizung und Leistung, die für Regelungszwecke herangezogen werden können.

3.2.4. Flächenheizungen

In Gebäuden im PASSIVHAUS-Standard können Flächenheizungen, wenn sie preiswert genug⁵ herstellbar sind, eine hervorragende Lösung zur Wärmeverteilung mit geringsten Vorlauftemperaturen darstellen. Ein Betrieb mit Außenluft-Wärmepumpen kann unter solchen Umständen auch im Kernwinter noch mit hohen Arbeitszahlen erfolgen. Zugleich kann in der warmen Jahreszeit bei einer Vorlauftemperatur von 20 °C oder mehr wirksam Wärme entzogen werden, ohne dass Taupunktunterschreitungen zu befürchten wären. Hierzu sind aber zwei Aspekte zu beachten.

Die verbreitete Erwartungshaltung gegenüber einer Fußbodenheizung, diese wäre so fühlbar warm, wie es aus konventionellen Gebäuden mit schwachem Wärmeschutz bekannt ist, wird bei hoch gedämmten Gebäuden nicht in der gleichen Weise erfüllt.

Die Heizlast in einem PASSIVHAUS beträgt um $10 \frac{W}{m^2}$ im Auslegungsfall, zumeist noch deutlich weniger. Unter der vereinfachenden Annahme, die Wärmeübertragung an den Raum erfolge rein radiativ und die gesamte Fläche des Raumes wäre mit der Heizung belegt, wird hierfür eine Übertemperatur von nur knapp 2 K benötigt.

Tatsächlich ist die Fläche etwas weniger ideal mit den Wärme führenden Rohren belegt, dafür wird zusätzlich Wärme durch Konvektion übertragender beheizte Boden wird jedenfalls von den Nutzenden nicht unmittelbar als *warm* empfunden. Dies gilt es frühzeitig klarzustellen.

Für die gebäudetechnische Planung bedeutet dies zum Anderen, dass auch die Vorlauftemperatur für solche Systeme nahe an der Raumtemperatur liegen kann. Eine lokale Regelung über Rücklauftemperaturbegrenzer kann eine einfache und elegante Lösung darstellen.

Sofern eine Flächenheizung durch Betonkerntemperierung erfolgt, kann auch diese in der Regel als alleiniges Wärmeübertragungssystem für Winter und Sommerbetrieb dienen. Durch den direkten Zugang zur Speichermasse der Decke ist ein gegenüber der Gebäudenutzung zeitversetzter Betrieb der Temperierung möglich

⁵Hohe Investitionen in ein Wärmeverteilsystem sind angesichts des geringen Wärmebedarfs kaum zu rechtfertigen.

3. Regelungsaufgaben

oder sogar geboten. In ungünstig gelegenen Eckräumen kann ggfs. mit einer zusätzlichen Wandheizung an demselben Heizkreis eine lokal etwas erhöhte Heizlast abgedeckt werden.

Sofern eine minimale Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf als Abschaltkriterium herangezogen werden soll (z.B. 1 K) muss diese durch entsprechend hochwertige Messtechnik festgestellt werden, da sich ansonsten die Bereiche der Messunsicherheiten beider Messstellen überschneiden und keine verlässliche Aussage erhalten wird. Hochgenaue Widerstandstemperaturfühler oder eine Brückenschaltung beider Sensoren zur Feststellung allein der *Temperaturdifferenz* können hier Lösungsansätze darstellen. Eine Rücklauftemperaturregelung mit Stilllegung der Pumpe bei minimalem Massenstrom wäre eine Alternative.

Weitaus besser ist es in jedem Fall, den Ladezustand des Betonkerns durch einen zwischen den Rohrreihen angeordneten Temperaturfühler direkt im Zentrum der jeweiligen Regelzone messen zu können und den Wärmeeintrag (im Sommer die Wärmeabfuhr) danach zu regeln. Hierfür kann ein horizontal in der Decke verlaufendes Leerrohr aus Kunststoff eingebaut werden, was es ermöglicht den Fühler erst in der Ausbauphase von einer abgehängten Flurzone aus einzubringen oder zu einem späteren Zeitpunkt zu warten.

Sofern keine besonders hohen internen Wärmelasten anfallen ⁶ kann eine einfache Regelstrategie in Nichtwohngebäuden im PASSIVHAUS-Standard für Winter und Sommer bereits darin bestehen, den Betonkern, beginnend ab 22:00 Uhr, so lange zu temperieren, bis die Kerntemperatur 22°C beträgt. Im Winter dringt die eingebrachte Wärme bis zu den Morgenstunden in den Raum und sichert zu Betriebsbeginn eine Raumtemperatur von 20°C ; Im weiteren Tagesverlauf geht der Wärmestrom aus dem Betonkern zurück, während die Freie Wärme die Deckung der Wärmeverluste übernimmt.

Im Sommer wird dem Beton entsprechend über Nacht Wärme entzogen und die Speicherfähigkeit der Betondecke regeneriert; diese kann dann am Tag die nutzungsbedingten Wärmelasten aufnehmen und den Temperaturanstieg innerhalb eines komfortablen Temperaturkorridors begrenzen.

Ein thermischer Zustand kann auch bei Betonkerntemperierung der Decke rechnerisch aus gemessenen Raumtemperaturen bestimmt und für die Regelung der Gebäudfunktionen herangezogen werden. Er zeigt dabei das Verhalten eines nicht aktivierten Bauteils unter den vorherrschenden Bedingungen an.

⁶Weniger als $4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ im Tagesmittel, wie es für Büro- und Verwaltungsgebäude und auch für Bildungsgebäude typisch ist.

3.2.5. Wärmepumpen

Bei der Planung von Wärmepumpensystemen sollte grundsätzlich darauf geachtet werden, dass zu jedem Zeitpunkt, in jedem Betriebszustand, bei jeder Anwendung die Senktemperatur nur so hoch wie unbedingt nötig ist.

Die Leistungsnachfrage in Heizsystemen schwankt regelmäßig stark, dies trifft auch auf Gebäude im PASSIVHAUS-Standard zu. Bei Nichtwohngebäuden mit Absenkbetrieb treten die höchsten Leistungen kurzzeitig in der Aufheizphase vor Betriebsbeginn auf.

Aus ökonomischen Gründen sollte die Kapazität generell auf $20...25 \frac{W}{m^2}$ begrenzt werden. Da die erreichbare Arbeitszahl von der Temperaturdifferenz des Wärmepumpenprozesses abhängt und zur Bereitstellung von Spitzenlasten hohe Systemtemperaturen erforderlich sind, ist im Einzelfall zu reflektieren, ob und unter welchen Bedingungen ein Absenkbetrieb für den Gesamtenergiebedarf noch vorteilhaft ist. Eine kontinuierliche Beheizung mit dann geringeren Systemtemperaturen und höherer Arbeitszahl ist in PASSIVHAUS-Gebäuden ohne erhöhten Gesamtenergieverbrauch möglich, so lange die Betriebsunterbrechung nur kurz ist. Eine Nachtabenkung ist daher zumeist nicht sinnvoll, erst längere Stillstandszeiten rechtfertigen einen moderaten Absenkbetrieb. Weiterhin gilt es zu beachten, dass bei kontinuierlichem Betrieb die installierte Leistung auf den stationären Fall ausgelegt und die Investition in die Wärmepumpe in etwa halbiert werden kann.

Um die Wärmeversorgung thermodynamisch günstig mit minimaler Temperaturdifferenz an der Wärmepumpe zu realisieren, sollten Pufferspeicher mit erhöhtem Temperaturniveau vermieden werden. Sofern der Wasserinhalt des Heizsystems nicht ausreicht und sie als zusätzliches Reservoir für die Abtauung von Außenluft-Wärmetauschern erforderlich sind, genügt dennoch eine minimale Größe. Für den Heizungsbetrieb sind sie nicht erforderlich, denn das Gebäudesystem ist träge und wirkt so selbst als Speicher. Eine kurzzeitig stark fluktuierende Leistungsnachfrage ist in PASSIVHAUS-Gebäuden nicht zu erwarten und längere Reaktionszeiten können toleriert werden.

Die maximale *stationäre* Heizlast liegt in Gebäuden im PASSIVHAUS-Standard um $10 \frac{W}{m^2}$ - auch sie wird jedoch nur selten erreicht. Über lange Zeiträume wird nur eine deutlich geringere Leistung benötigt, denn Wärmeverluste des Gebäudes werden zu wesentlichen Teilen durch freie Wärme gedeckt und die aktive Heizung tritt nur bei Bedarf ergänzend hinzu.

Für ein Wärmepumpensystem ist daher ein breiter Modulationsbereich erforderlich um Taktbetrieb zu vermeiden, der die erreichbaren Arbeitszahlen systematisch senkt und einen starken Verschleiß der Geräte bewirkt. Kompressoren mit Umrichter lassen sich bis ca. 25 % der Nennleistung drosseln, was aber für kleine

3. Regelungsaufgaben

Leistungen im Normalbetrieb nicht immer ausreicht. Daher bietet sich bei größeren Gebäuden eine Kaskadierung mehrerer Geräte an. Bei marktüblichen Geräten ist eine entsprechende Steuerung für mehrere Geräte zumeist bereits integriert.

In Fällen, die nur zwei Geräte erfordern, kann vorteilhaft mit einer asymmetrischen Aufteilung der Gesamtleistung gearbeitet werden; Ein Verhältnis von $\frac{1}{3}$ zu $\frac{2}{3}$ bietet sich an; So kann etwa eine Gesamtleistung von 30 kW durch zwei Geräte zu 10 kW und 20 kW bereitgestellt werden. In Verbindung mit einer Modulationsfähigkeit jeweils zwischen 100...25 % kann damit jede Leistung von 2,5 kW bis 30 kW ohne Taktbetrieb realisiert werden. Das entspricht dann einem effektiven Modulationsbereich von 12:1, gegenüber 8:1 bei symmetrischer Aufteilung. Die Umschaltung der Geräte erfordert eine entsprechende Steuerung, deren Logik beispielhaft in Anhang E dargestellt ist.

3.3. Regelungsaufgaben der Systeme zur Wärmeabfuhr

3.3.1. Auskühlung der Speichermassen durch Nachtlüftung

Mit dem thermischen Zustand liegt eine qualifizierte Information über den Zustand der thermischen Speichermassen vor, nach der Systeme zur Wärmeabfuhr zielgenau geregelt werden können. Im Gegensatz zur Regelung nach der Raumtemperatur ist hier auch nicht zu befürchten, dass die Wärmeabfuhr vorzeitig beendet wird, oder das System in einen taktenden Betrieb übergeht, indem etwa kühle Außenluft die Raumlufttemperatur rasch und stark absinken lässt - obwohl es noch zu keiner ausreichenden Abkühlung der Gebäudemasse gekommen ist. Lüftungsklappen, Fensterantriebe oder auch besondere Abluftventilatoren kommen auf Basis des thermischen Zustandes im Betriebsmodus 4, *Passive Kühlung* so lange zum Einsatz, wie es aus Gründen der Wärmeabfuhr tatsächlich erforderlich ist.

Sofern das Lüftungssystem für eine nächtliche Lüftung zur Wärmeabfuhr eingerichtet wird, erfordert seine Aktivierung zunächst eine ausreichend große Temperaturdifferenz des Gebäudeinneren zur Außenluft. Da aus dem Betrieb der Ventilatoren Wärme in den Luftstrom eingebracht wird und eine mehr als marginale Wirkung erzielt werden soll, die den Energieeinsatz zur Luftförderung rechtfertigt, muss diese Temperaturdifferenz $\vartheta_{thZ} - \vartheta_{AU} \geq 3\text{ K}$, besser $\geq 5\text{ K}$ betragen. Der Betrieb erfolgt, bestimmungsgemäß, ohne Wärmerückgewinnung.

Eine mindest-Zulufttemperatur durch teilweise Wärmerückgewinnung wird bisweilen gefordert, wenn bei geringen Außentemperaturen Wärme abzuführen wäre; Dies diene dann der Vermeidung von möglichen Taupunktunterschrei-

tungen an den (ungedämmten) Kanaloberflächen.

Tatsächlich weisen übliche Nichtwohngebäude wie Schulen und Verwaltungsgebäude nur geringe interne Feuchtequellen auf; Diese Feuchte wird auch durch den Lüftungsbetrieb kontinuierlich abgeführt. Zudem ist bei einem hohen Luftwechsel zur Nachtauskühlung der Taupunkt der Raumluft praktisch gleich dem der Außenluft. Nimmt man weiterhin für einen einfachen Blechkanal einen Wärmedurchgangskoeffizienten $U = 5,8 \frac{W}{m^2 K}$ an, liegt dieser in guter Näherung gleichauf mit dem Strahlungsaustausch bei 1 K Temperaturdifferenz. Nachtauskühlung wird nur aktiviert, wenn der thermische Zustand und mit ihm die Strahlungstemperatur im Raum entsprechend hoch liegen. Somit kann die Temperatur der Kanaloberfläche nicht wesentlich unter der Raumtemperatur liegen und allenfalls im Anfahrzustand kurzzeitig eine geringe Menge Kondensat auftreten. Eine sofortige Wiedererwärmung der Kanaloberflächen nach Beendigung der Nachtlüftung ist ebenfalls gesichert. Bei üblichen Gebäudenutzungen tritt das befürchtete Problem also nicht auf.

3.3.2. Wärmeabfuhr durch aktive Kühlung

Reicht die Wärmeabfuhr über passive Maßnahmen nicht aus, oder wird sie durch hohe Außenlufttemperaturen in der Nacht (Tropennächte) unmöglich, kann der thermische Zustand den Betriebsmodus 5, *Aktive Kühlung* anzeigen. Damit werden dann Kühlsysteme aktiviert, die unabhängig von der Außentemperatur arbeiten können, also Kompressionskältemaschinen bzw. Flächenkühlungen mit Anbindung an Grundwasser oder Erdreich. Die Jahresarbeit der zuletzt genannten Systeme ist oft beschränkt und kann so auf eine notwendige Kernzeit konzentriert werden.

Eine Leistungsanpassung über das durch Kompressionskälteanlagen zur Verfügung gestellte Temperaturniveau kann im Sinne der Heizungsregelung mit einer Steuerkurve am thermischen Zustand orientiert werden, wie in Anhang D anhand einer einfachen linearen Skalierung demonstriert.

3.3.3. IT-Kühlung

Kleinere Serverräume und Stockwerksverteiler-Räume werden in vielen Nichtwohngebäuden vorgesehen. Hier fallen bezogen auf die Grundfläche erhöhte Wärmelasten an.

Im einfachsten Fall kann der Raum als Abluftraum mit hohem Luftwechsel, überströmend aus der angrenzenden Verkehrsfläche, geplant werden.

Ist die Wärmeleistung dafür zu groß, werden Umluftkühler erforderlich. Wenn es weitere relevante Kühlbedarfe im Gebäude gibt, kann ein eigenes hydraulisches Netz mit entsprechender Temperatur (z.B. 12 °C) sinnvoll sein, allerdings fallen

3. Regelungsaufgaben

hier hohe Verteilverluste und Kosten an. Zudem wird in der Regel eine besondere Auffangwanne für den Fall von Undichtigkeiten im Wasserkreislauf vorgesehen, was eine entsprechende Leitungsführung erforderlich macht.

Die Raumtemperatur aktiv gekühlter IT-Räume sollte auf $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingestellt werden, was eine relevante Wärmebelastung angrenzender Räume im Sommer ausschließt, die IT-Komponenten nicht gefährdet und im Winter einen Anteil direkter Wärmeleitung in benachbarte Bereiche ermöglicht.

Alternativ können Serverschränke mit integrierter Kompressorkühlung flexibel eingesetzt werden. Ein Kondensator kann dann die Wärme entweder direkt in den Außenraum abführen oder sie in den Abluftstrom des Lüftungssystems übertragen. So könnte sie im Winterfall noch weiter im Gebäude genutzt werden. Gegebenenfalls ist auch ein Kondensator mit Wasser-Wärmetauscher möglich, der Wärme etwa in den Rücklauf einer Betonkerntemperierung einspeist.

Größere Serveranlagen erfordern immer eine gesonderte Fachplanung. Die anfallende Wärme übersteigt schnell jeden in einem PASSIVHAUS möglichen Wärmebedarf.

3.4. Regelungsaufgaben der Sonnenschutzsysteme

Für hocheffiziente Nichtwohngebäude muss stets sichergestellt werden, dass ein zweckmäßiger Betrieb der Sonnenschutzsysteme ohne Nutzereingriff auch außerhalb der Nutzungszeiten gesichert ist.

Dabei ist eine saisonale Anpassung des Betriebsverhaltens zwischen Winterbetrieb (passiv-solare Warmegewinne werden ermöglicht) und Sommerbetrieb (solare Wärmelasten werden minimiert) notwendig. Welche Betriebsart vorliegt entscheidet sich an den Innentemperaturen eines Gebäudes, welche deshalb in der Verschattungsregelung berücksichtigt werden müssen.

3.4. Regelungsaufgaben der Sonnenschutzsysteme

Der thermische Zustand eines Gebäudes zeigt zuverlässig an, ob ein weiterer Beitrag aus passiv-solaren Wärmegegewinnen über die Fenster und Verglasungen wünschenswert oder abträglich ist. Im Winter befindet sich das Gebäude zumeist in den Modi 1, *Heizen* oder 2, *Neutral kühl* und Solargewinne sind hilfreich. Die Regelung sollte in dieser Situation sicherstellen, dass alle Verschattungseinrichtungen deaktiviert bleiben um solare Einträge nutzen zu können. Nur einzelne Nutzereingriffe können dann eine temporäre Abweichung für kleine Bereiche erzwingen. Eine Rücksetzung auf das Automatiksignal ist immer vorzusehen, ein Zeitraum von 1...3 h hat sich bewährt. Der genaue Wert ist für die Nutzerzufriedenheit wichtig und mit der Gebäudenutzung, etwa dem Stundenplan einer Schule, abzustimmen.

Wird der Betriebsmodus 3, *Neutral warm* erreicht, kehrt sich die Anforderung um. Die Verschattung ist, entsprechende Solareinstrahlung $\geq 150 \frac{W}{m^2}$ ($\approx 15 \text{ kLux}$, Einstellwert) auf die betroffene Fassadenebene vorausgesetzt, automatisch geschlossen. Wiederum kann ein temporärer Nutzereingriff erfolgen, tritt die Automatik nach der angemessenen Zeit wieder in Kraft.

Es kann sinnvoll sein die Regelzonen der Sonnenschutzeinrichtungen nicht nur nach Himmelsrichtung, sondern auch geschossweise zu differenzieren, damit Einflüsse der Umgebungsverschattung berücksichtigt werden können. Nutzende reagieren erfahrungsgemäß empfindlich auf Fahrvorgänge des Sonnenschutzes, die nicht unmittelbar notwendig erscheinen.

Für Gebäude im PASSIVHAUS-Standard sind nur außenliegende Sonnenschutzsysteme ausreichend wirksam. Der Sonnenschutz soll so ausgeführt sein, dass er bis zu einer Windgeschwindigkeit von $\geq 10 \frac{m}{s}$ betrieben werden kann; Die zulässige Windgeschwindigkeit des jeweiligen Produktes ist in der Windüberwachung auszunutzen. Die Messung der Windgeschwindigkeit soll in der jeweiligen Fassadenebene erfolgen, da die Windverhältnisse auf dem Dach zumeist kein geeignetes Maß für die tatsächliche Gefährdung der Verschattungseinrichtungen durch Wind sind, was zu häufigen und unnötigen Fahrvorgängen führt. Neben der suboptimalen Sonnenschutzwirkung ergibt sich hier oftmals ein Konflikt mit den Nutzenden.

Für Nichtwohngebäude sollte durch einen geteilten Behang eine Tageslichtnutzung bei aktivierter Verschattung möglich bleiben. Für die winterliche Nutzung solarer Wärme wird für Nichtwohngebäude mit Bildschirmarbeitsplätzen ein innen liegender Blendschutz empfohlen, der manuell aktiviert werden kann. Alternativ kann eine Cutoff- bzw. Retrostellung der Lamellen programmiert werden, was allerdings die Möglichkeit solarer Wärmegegewinne beeinträchtigt und im Einzelfall abgewogen werden muss.

4. Energieeffizienz der Gebäudeautomationssysteme

Mittels Gebäudeautomation lassen sich in Passivhäusern keine nennenswerten Energieeinsparungen mehr erzielen, sie ist aber eine funktionale Notwendigkeit des Gebäudebetriebs. Der Hilfsenergiebedarf ist hier unter anderem deshalb sehr bedeutend, als Automationssysteme in der Regel dauerhaft in Betrieb bleiben, auch über die Nutzungszeit der Gebäude hinaus. Praxiserfahrungen belegen einen elektrischen Energiebedarf von $1...2 \frac{W}{m^2}$, was wenig erscheint, sich durch die Größe der Gebäude und die langen Zeiträume aber auf eine ähnliche Größe summiert, wie der Stromverbrauch der eigentlichen Gebäudenutzung. Ein energieeffizienter Betrieb der Automationseinrichtungen ist daher bedeutend, stromsparende Automationsstationen und Aktoren sollten bevorzugt werden.

Diskussionen zur Ausarbeitung von Anforderungen im Rahmen der europäischen ECODESIGN Regelungen werden geführt, bislang (2025) allerdings ohne erkennbares Ergebnis.

Energieeffiziente und an die tatsächlichen Lasten angepasste moderne Schaltenteile mindestens nach *Level VI*, besser noch nach den *CoC Tier 2*-Anforderungen, sollten selbstverständlich sein. Eine geringere Anzahl leistungsstarker, gut ausgelasteter Adapter verhält sich günstiger als einzelne Adapter für jedes Gerät.

Aber auch die Automationsstationen, Raumbediengeräte und Sensoren selbst sind derzeit häufig nicht hinsichtlich ihres Eigenverbrauchs optimiert; es lohnt sich, unterschiedliche Geräte zu vergleichen und präzise Auskünfte von den Herstellern zu verlangen. Maßgeblich sind nicht die in Datenblättern für die Auslegung der Stromversorgung angegebenen Anschlussleistungen, sondern die Leistungsaufnahme im praktischen Betrieb. Eine Orientierung für die Bewertung gibt Tabelle 4.1. Die Werte verstehen sich je Funktion bei Automationsstationen, I/O-Modulen, Sensoren und dergleichen im Regelbetrieb.

4. Energieeffizienz der Gebäudeautomationssysteme

Bewertung Feldgerät	Leistungsbedarf einschl. Netzadapter je Mess-/Schalt-/Regelgröße
sehr gut	0.03 W
gut	0.1 W
befriedigend	0,25 W
mangelhaft	0,5 W
ungenügend	≥ 1 W

Tabelle 4.1.: Orientierende Werte für den Leistungsbedarf je Funktion von Automationskomponenten

Ähnliches gilt für Klappenantriebe und sonstige Aktoren. Deren Antriebsfunktion wird meist nur selten und für kurze Zeiten angefordert- maßgeblich ist der Verbrauch im Halte- und Bereitschaftszustand; auch hierfür können die Werte nach Tabelle 4.1 orientierend verwendet werden. Ungünstig verhalten sich damit thermische Stellantriebe, die zur Erhaltung ihres Zustandes auf dauernde Energiezufuhr durch elektrische Beheizung angewiesen sind. Insbesondere im Sommer ist dieser Wärmeeintrag zudem schädlich für den thermischen Komfort.

Herkömmliche Relais zum Schalten größerer Lasten bieten zwar einen geringen elektrischen Widerstand auf der Lastseite, sie benötigen jedoch dauerhaft elektrische Energie zur Erhaltung ihres Schaltzustandes. Wird ein Verbraucher durch ein Relais geschaltet, fällt dauerhaft ein Leistungsbedarf von 150...1000 mW an, der zur Erwärmung des Schaltschranks beiträgt und den Stromverbrauch erhöht. Viele Geräte in der Gebäudetechnik, wie etwa Pumpen, sind über lange Zeiträume in Betrieb und allein die Halteleistung der Relaispulen kann sich auf relevante Beträge summieren.

Eine Verbesserung kann durch die Beschaltung der Relaispule mit einem Kondensator und einem Widerstand in der Weise erreicht werden, dass der Ladestrom des Kondensators hoch genug ist, um den Schaltzustand zu ändern, während anschließend nur ein deutlich verminderter Haltestrom fließt.

Alternativ kann die Relaisspule durch einen PWM¹-Ausgang angesteuert werden, der für eine kurze Zeit die volle Leistung abgibt und diese anschließend reduziert. Vorteilhaft ist, dass das genaue Verhalten in Software definiert wird und somit leicht anzupassen ist.

Einfacher ist der Einsatz sog. *polarisierter Relais*, deren magnetischer Teil zusätzlich einen Permanentmagneten enthält. Dieser kann die von dem elektromagnetischen Teil aufzubringende Kraft vermindern, es kann eine deutlich kleinere Spule mit geringerem Stromfluss zum Einsatz kommen.

Bistabile Relais benötigen nur einen Strompuls um ihren Schaltzustand zu wechseln und verbleiben darin bis zu einem entgegengesetzten Impuls. Eine elektrische Halteleistung ist nicht erforderlich. Allerdings stellt sich bei einem Stromausfall auch kein definierter Zustand ein, was bei sicherheitskritischen Anwendungen besondere Vorkehrungen durch eine entsprechende Zusatzschaltung erfordert.

Elektronische *Solid State Relais* (SSR) sind zwar annähernd leistungslos schaltbar, haben bei der konventionellen Ausführung auf Siliziumbasis aber auf der Lastseite eine hohe Verlustleistung von um 3,5 % der Last, was sie für Daueranwendungen ausschließt. Die Entwicklung bei Halbleitern aus Siliziumcarbid (SiC) könnte hier in näherer Zukunft deutliche Verbesserungen auf wenige $m\Omega$ bringen.

Auch die Netzwerkkomponenten und Bus-Systeme sowie Repeater und deren Spannungsversorgungen sind bei großen Gebäuden relevant. Gateways zur Verknüpfung mehrerer unterschiedlicher Systeme mögen eine Trennung nach Gewerken erlauben und so zur Eindeutigkeit der Gewährleistungspflichten beitragen. Durch ihren eigenen Energieverbrauch und Doppelungen bei der Infrastruktur begünstigt eine solche Herangehensweise aber *nicht* einen zuverlässigen und sparsamen Betrieb.

¹ *Pulse Width Modulation*, Pulsbreitenmodulation

5. Betriebsüberwachung

Eine hinreichend genaue Überwachung des laufenden Gebäudebetriebs ist die Voraussetzung für die systematische Erkennung von Unregelmäßigkeiten. Erst die Kenntnis der tatsächlichen Betriebsdaten ermöglicht eine fundierte Bewertung des Raumkomforts in Bezug auf etwaige Rückmeldungen der Nutzer sowie eine systematische Einregulierung der technischen Systeme in den ersten Betriebsjahren. Sie ist weiterhin die Voraussetzung für eine fortlaufende Betriebsoptimierung. Anhand eines zuvor festgelegten Detaillierungsgrades der Untersuchung müssen somit geeignete Mess- und Zähleinrichtungen vorgesehen werden.

Um eine qualifizierte Betriebsüberwachung durchführen zu können, muss die Erfassung und dauerhafte Speicherung der entsprechenden Daten von Beginn an sichergestellt werden. Nur auf Grundlage gemessener Werte kann eine Fehlfunktion rasch und zielsicher erkannt und behoben werden.

Eine langfristige Historisierung der Daten, über mehrere Jahre hinweg, ermöglicht systematische Vergleiche und ein Auffinden von Korrelationen und Zusammenhängen. Wetterparameter, Raumtemperaturen und Energiezählerwerte sind von vorrangiger Bedeutung; Temperaturen und Schaltzustände in gebäudetechnischen Systemen sind darüber hinaus sehr hilfreich. Für Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung sind die Luftvolumenströme und Lufttemperaturen, sowie das Maß der Wärmerückgewinnung bedeutsam. Auch ein Unterzähler für den Stromverbrauch ist einfach vorzusehen und sehr hilfreich zur Bewertung des Betriebsverhaltens. Bei Wärmepumpen sind Strom- und Wärmezähler immer vorzusehen. Es muss klar dokumentiert sein, ob auch Pumpen und Regelungen in die elektrische Unterzählung eingehen.

Daten sollten in Intervallen von 15 *min* historisiert werden. Dies balanciert eine ausreichende Abbildung dynamischer Vorgänge mit Anforderungen an den Speicherplatz, der heute dank preiswerter Speichermedien allerdings keinen relevanten Engpass mehr darstellt. Wichtig ist allerdings ein Mechanismus zur regelmäßigen Datensicherung. Die Werte sollten im regelmäßigen Intervall einzeln mit Zeitstempeln gespeichert werden und nicht nur bei *change of value* (COV). Ein solches Vorgehen gewährt eine größere Sicherheit im Fall von Fehlfunktionen der Datenerfassung selbst.

Für den Fall, dass eine vertiefende Analyse durchgeführt werden soll, ist eine einfache Exportmöglichkeit als CSV-Spaltendatei flexibel und bewährt.

5. Betriebsüberwachung

Für die quantitative Auswertung des Energieverbrauchs ist das Wetter im Betrachtungszeitraum eine wichtige Randbedingung. Es sollte frühzeitig geklärt werden, aus welcher Quelle und auf welchem Weg für den Gebäudeort valide Wetterdaten, einschließlich Globalstrahlung, bezogen werden können. Bodengemessene Daten der Wetterdienste sollten nach Möglichkeit bevorzugt werden. Anderenfalls sind Reanalysedaten aus den Wettermodellen für jeden Ort und beliebige Zeiträume verfügbar, etwa über [Historical Weather API](#).

Alternativ können die Parameter am Gebäude gemessen werden. Dann sollten allerdings die in vielen Fällen erhöhten Messunsicherheiten beachtet werden, insbesondere für die Globalstrahlungsmessung. Einfache Strahlungssensoren mit Silizium-Photodioden sind für die quantitative Auswertung nicht immer geeignet und bei Sensoren an Gebäuden wird, im Gegensatz zu Wetterstationen, auch die Kalibrierung nicht regelmäßig geprüft.

5.1. Nutzerkomfort

Nimmt ein neu erstelltes Gebäude den Betrieb auf besteht häufig der Wunsch nach einer etwa einmonatigen Testbetriebsphase ohne Nutzung. Dies soll die Einregulierung der Systeme erleichtern. Gleichwohl bestehen in nahezu allen Fällen Verzögerungen im Bauablauf, die ein solches Vorgehen unmöglich machen und ein hoher Kostendruck, der ebenso die Nutzung des Gebäudes vom frühestmöglichen Zeitpunkt an gebietet. Insofern muss in der Regel in der frühen Nutzungsphase und parallel zum Einzug der Nutzer der Testbetrieb des Gebäudes erfolgen. Es bestehen hohe Erwartungen an das neue Gebäude und dessen Nutzungskomfort.

Die Betriebsüberwachung hat damit in der ersten Zeit den Nutzungskomfort zu fokussieren. Da anfangs noch keine Werte vorliegen, kann die Auswertung der Energieverbrauchsdaten erst zu einem späteren Zeitpunkt beginnen. Gerade deshalb ist allerdings die korrekte Funktion der Datenerfassung, die Vollständigkeit und Konsistenz der gesammelten Daten frühestmöglich zu prüfen.

Sofern die Gebäudehülle fachkundig geplant und qualitätsgesichert ausgeführt wurde, auch das Ergebnis des Luftdichtheitstests die Kriterien und Empfehlungen für Passivhäuser einhält, muss nicht mit Zugluft gerechnet werden. Der Schwerpunkt der Betrachtung kann daher auf Raumlufttemperatur und -feuchte sowie ggfs. Luftqualität (zumeist anhand der Leitgröße CO_2 -Konzentration) liegen. Die Raumtemperatur ist repräsentativ für den thermischen Komfort, da Strahlungssymmetrien und relevante Luftgeschwindigkeiten im Regelfall nicht bestehen. Raumluftfeuchte und CO_2 -Konzentration geben wertvolle Hinweise auf die Funktion des Lüftungssystems und dessen adäquate Einstellung bezüglich der Nutzerzahl.

len: Gleichzeitig geringe Feuchte und CO_2 -Konzentration im Winter weisen auf überhöhte Luftmengen hin, dauerhaft erhöhte Werte zeigen eine zu geringe Luftmenge an.

Werden dennoch Rückmeldungen über Zugluft festgestellt, so sind diese zumeist auf Fehler im Lüftungssystem zurückzuführen. Insbesondere in dicht belegten Räumen (etwa Klassenzimmern oder Seminarräumen) kann es aufgrund der großen Luftvolumenströme zu Störungen kommen, sofern die Luftführung nicht sorgfältig geplant oder fehlerhaft ausgeführt wurde.

Besonders unter sommerlichen Bedingungen hat die Funktion der Verschattungseinrichtungen einen großen Einfluss auf die Innenraumbedingungen. Hier sind gegebenenfalls die Steuerparameter anzupassen. Die Regelungseinstellungen sollten aber stets schon vor Eintritt der warmen Jahreszeit vor Ort auf Plausibilität geprüft werden.

Ist das Vertrauen in das Betriebsverhalten des Gebäudes bereits gewachsen und wird eine rationellere Überwachung angestrebt ist es hilfreich, die Zeitreihen der Einzelmesswerte statistisch zusammenzufassen. Eine Aggregation in Boxplots mit Min/Max/Median/Quartilen oder die Darstellung in Form von Histogrammen ist hilfreich um längere Datenreihen rasch zu überblicken. Die Betrachtungszeiträume sollten einfach und flexibel einstellbar sein.

Wird eine solche Überwachung und Interpretation der Daten fachkundig und regelmäßig durchgeführt, entsteht ein fundiertes Bild zum aktuellen Gebäudeverhalten. Auch kann qualifiziert und objektiv mit Rückmeldungen der Nutzer umgegangen werden. Unregelmäßigkeiten werden frühzeitig erkannt und können hinsichtlich der Ursache (z.B. durch Korrelation mit anderen Messgrößen) eingegrenzt werden - etwa wenn überhöhte Raumlufttemperaturen stets bei hoher Globalstrahlung auftreten und damit auf ungenügende Funktion der Verschattungseinrichtungen hinweisen. Noch besser sind Änderungen zu interpretieren, wenn bereits Erfahrungswerte aus Vorjahren vorliegen.

5.2. Energieverbrauch

Die quantitative Betriebsüberwachung hinsichtlich des Energieverbrauchs setzt neben der Erfassung von Raumkonditionen und Wettergeschehen die Kenntnis der Energieströme an der Bilanzgrenze (Gebäudehülle) voraus. Auch wenn lediglich mit ohnehin vorhandenen Abrechnungszählern gearbeitet wird, empfiehlt es sich bereits in der Planung die Anordnung dieser Zähleinrichtungen überlegt vorzunehmen. Mögliche Verbrauchsanteile außerhalb der thermischen Gebäudehülle des betrachteten Gebäudes sollten, sofern von relevanter Größenordnung, durch Untertähler erfasst werden.

5. Betriebsüberwachung

Zur richtigen Interpretation der gewonnenen Daten sind wiederum Nebeninformationen hilfreich, nicht zuletzt eine qualifizierte Regelungsbeschreibung der Gebäudetechnik, die bei allen Optimierungen fortgeschrieben wird sowie die Nutzungszeiten. Ein Wiki auf dem Management- und Bedienrechner könnte ein pragmatischer Ansatz sein und den jeweils aktuellen Stand leicht zugänglich dokumentieren. Auch hier ist eine systematische Datensicherung vorzusehen.

Ein zentrales Hilfsmittel für die quantitative Auswertung ist die Energiebilanzrechnung mit dem PASSIVHAUS-PROJEKTIERUNGSPAKET (PHPP). Dies hat verschiedene Vorteile:

- Die PHPP-Berechnung ist aus der Planung für Passivhäuser ohnehin vorhanden
- Die PHPP-Berechnung enthält eine umfassende Charakterisierung des Gebäudes und aller Energieströme an der Bilanzgrenze
- Die PHPP-Berechnung gibt im Detail Aufschluss über die unter Planungsbedingungen zu erwartenden Energieströme für unterschiedliche Energieanwendungen
- In der PHPP-Berechnung sind Angaben zu Nutzenergie und Endenergie unterschieden

Vollständigkeit und Korrektheit der PHPP-Berechnung sollten schon während der Planung im Rahmen einer Gebäudezertifizierung von einem unabhängigen Dritten geprüft worden sein.

Aufbauend auf diesem Planungsmodell lässt ein an die im Betrachtungszeitraum vorherrschenden Randbedingungen angepasstes Rechenmodell verlässliche Prognosen der zu erwartenden Energieströme zu. Ein Abgleich dieser Kennwerte mit tatsächlichen Verbrauchsdaten gibt anschließend (innerhalb der Rechen- und Messgenauigkeiten) entscheidende Hinweise zu Übereinstimmung von rechnerischer Erwartung und gemessener Realität.

Die verschiedenen Parameter haben je nach Gebäude unterschiedlich gewichtete Einflüsse auf die Energieströme. Somit erscheint eine zielgerichtete Betriebsüberwachung nur mit einem solcherart qualifizierten Vergleichsmaßstab überhaupt möglich. Er liefert zudem Hinweise, in welchen Verbrauchssektoren gegebenenfalls eine Diskrepanz von Erwartung und Realität besteht, wie groß diese ist und wo folglich mit einer systematischen Fehlersuche bzw. Betriebsoptimierung anzusetzen wäre.

Eine monatliche Bilanzierung, wie im PHPP als Standard verwendet, ermöglicht die Aktualisierung in praxisgerechten Abständen.

Zu diesem Zweck müssen die Messwerte aufbereitet werden, um die erforderlichen Eingabedaten für das PHPP zu erhalten. Hier werden mindestens die folgenden Hilfsrechnungen benötigt:

- Bestimmung der mittleren Gebäudetemperatur über eine flächengewichtete Mittelwertbildung
- Erstellung eines Wetterdatensatzes aus den verfügbaren meteorologischen Größen
- Anpassung der Betriebszeit und Belegungsdichte des Gebäudes, sofern abweichend von der Planung
- Bestimmung tatsächlicher interner Wärmegevinne aus Anwesenheit von Personen und Verbrauch an Elektrizität unter Berücksichtigung von Verdunstungs- und Ablaufverlusten

Die Aufbereitung und Verarbeitung der Werte ist ab Version 10 zu großen Teilen direkt im Arbeitsblatt MONI des PHPP möglich. Auch ein Vergleich der rechnerisch erwarteten Beträge mit den gemessenen Verbrauchswerten erfolgt automatisch und wird graphisch aufbereitet. Die Wirkung von Messunsicherheiten wird berücksichtigt, indem die Bandbreite plausibler Werte berechnet wird.

Sofern zumindest in der Anfangszeit eine solche Analyse erfolgt, und keine Unstimmigkeiten auftreten, kann mit großer Sicherheit von einer bestimmungsgemäßen Funktion des Gebäudes ausgegangen werden.

Die **MONITORING-PLATTFORM** des PASSIVHAUS INSTITUTS (PHI) enthält eine Visualisierung, statistische Vorauswertung und Einordnung von Messwerten ebenso, wie eine automatisierte Aufbereitung und Übertragung in das PHPP bis hin zur Erstellung eines Berichtes. Ideal wäre eine Integration dieser Art Auswertung in die Gebäudeautomationssysteme, so dass Gebäudebetreiber nach einmaliger Einrichtung stets über aktuelle, fundierte Informationen verfügen.

6. Literaturempfehlungen

- Grundlagen des PASSIVHAUS-Konzeptes
- Zusammenfassung von Ergebnissen des ARBEITSKREISES KOSTENGÜNSTIGE PASSIVHÄUSER Nr. 59, *Die Potentiale der Gebäudeautomation optimal nutzen.*
- Protokollband des ARBEITSKREISES KOSTENGÜNSTIGE PASSIVHÄUSER Nr. 59, *Die Potentiale der Gebäudeautomation optimal nutzen.*
- Protokollband des ARBEITSKREISES KOSTENGÜNSTIGE PASSIVHÄUSER Nr. 52, *Inbetriebnahme und Betriebsoptimierung.*
- Protokollband des ARBEITSKREISES KOSTENGÜNSTIGE PASSIVHÄUSER Nr. 45, *Richtig messen in Energiesparhäusern.*
- FEIST W. (2007). Ch. D4, *Passivhäuser in der Praxis*, in Bauphysik Kalender 2007: Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, pp. 675-741. John Wiley & Sons, Ltd (2007)
- Jürgen Schnieders: „Wirkung von Position und Art der Lüftungsöffnungen auf den Schadstoffabtransport“, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Phase III, [Protokollband Nr. 23](#), Einfluss der Lüftungsstrategie auf die Schadstoffkonzentration und – ausbreitung im Raum, S. 85-123, 1. Auflage, Hrsg. Wolfgang Feist, Darmstadt, Juli 2003
- [Leitfaden für energieeffiziente Bildungsgebäude](#)

7. Formalia

7.1. Impressum

Wolfgang Hasper
Messen, Steuern, Regeln für Gebäude im Passivhaus-Standard
Version 25. Februar 2026
gesetzt aus der Computer Modern 11p

Passivhaus Institut GmbH
Rheinstraße 44/46
D-64283 Darmstadt
Registergericht: Amtsgericht Darmstadt
Registernummer: HRB 99027
Geschäftsführer:
Jessica Grove-Smith, Jürgen Schnieders, Jan Steiger, Jan Vahala
Tel.: +49 (0) 6151 82699-0
mail@passiv.de
www.passiv.de

7.2. Haftungsausschluss

Die Inhalte dieses Textes wurden mit größter Sorgfalt und nach bestem Wissen und Gewissen zusammengestellt. Für eventuelle inhaltliche Mängel oder Druckfehler kann jedoch keine Gewähr übernommen werden. Hinsichtlich der Verwendung von gezeigten Informationen muss jeder die Anforderungen von Gesetzen, Normen oder Verordnungen eigenverantwortlich überprüfen. Jegliche Haftung für die Richtigkeit der Inhalte und Daten, für eventuelle Schäden oder Konsequenzen, die durch die Nutzung des angebotenen Wissensstoffes entstehen, wird ausgeschlossen.

A. Berechnung des thermischen Zustandes

Ein Code-Beispiel (Python) für die Berechnung des thermischen Zustandes eines Gebäudes aus gemessenen Raumtemperaturen. Die berechnete Kerntemperatur bedarf anschließend noch einer Glättung über eine Tagesperiode.

```
# Passivhaus Institut GmbH, Wolfgang Hasper, 2026

# This program is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of
# the GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either
# version 3 of the License, or (at your option) any later version.
# This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY WARRANTY;
# without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.
# See the GNU General Public License for more details.
# You should have received a copy of the GNU General Public License along with this program.
# If not, see <https://www.gnu.org/licenses/>.

# A dynamic resistor-capacitor (RC-) model of a massive concrete member
# to approximate the concrete core temperature from measured
# room temperatures as are usually available in building automation systems
# in order to save the spending on dedicated concrete core temperature sensors.
# The synthetic concrete core temperature presents a useful form of low pass filter, the
# result indicates the thermal condition of the
# building and can hence be used to control systems accordingly.
#
# Assumptions:
# Over long periods of time equalised radiative temperature within the
# entire room can be assumed for well-insulated buildings ("thermal short-circuit"):
# The radiative heat exchange between room-defining surfaces (-5.8 W/K) dominates any
# other heat transferring processes.
# Hence the assumption room temperature = surface temperature of the concrete member is a justified
# approximation.
# This eliminates all complications of the variable convective heat transfer coefficient.
# The model is further symmetric.
#
# The model considers 5 layers of reinforced concrete
# and 1 unit area (1m²)
# The innermost node is the symmetry point (index 5)
#
# density      rho      kg/m³
# spec capacity c      Ws/(kgK)
# conductivity LAMBDA  W/(mK)
# heat flux    Q        W
# conductance  L        W/(m²K)
# capacity     C        Ws/(Km²)
# total nodes  N        -
# node         n        -
# time step    DT       sec
# layer thickness m
# Room temp.   tr       °C
```

A. Berechnung des thermischen Zustandes

```

# start conditions:
# temperature within neutral band to ensure a reasonable start
# in summer or winter

# room temperature tr is fed into the function in regular intervals
def RCmodel(tr):

    # constants
    RHO = 2400
    C = 1080
    LAMBDA = 2.1
    D1 = 0.025
    D2 = 0.025
    D3 = 0.025
    D4 = 0.025
    D5 = 0.025

    # surface heat transfer coefficient, approx. 5.8 W/(m²K) radiative,
    # convective disregarded as highly depending on direction of heat flow
    L0 = 5.8

    L1 = LAMBDA / D1 # W/(m K) * 1/m = W/(K m²)
    L2 = LAMBDA / D2
    L3 = LAMBDA / D3
    L4 = LAMBDA / D4

    # symmetry / adiabatic boundary
    # L5 = 0

    # area specific capacity of each layer
    C1 = D1 * RHO * C # m * kg/m³ * Wsec/(kgK) = Wsec/(m²K)
    C2 = D2 * RHO * C
    C3 = D3 * RHO * C
    C4 = D4 * RHO * C
    C5 = D5 * RHO * C

    DT = 60 # Internally the model operates on a 60 sec timestep, for reasons of numerical stability

    # Model geometry:
    #
    #           q1           q2           q3           q4           q5           q6 = 0 = symmetry
    #
    # Room temperature tr -L0 - C1 - L1 - C2 - L2 - C3 - L3 - C4 - L4 - C5 - L5
    #
    #           t1           t2           t3           t4           t5
    #
    # The temperature t5 of C5 is the desired result

    global t1
    global t2
    global t3
    global t4
    global t5

    # loop the model for the number of 60-sec time steps that fit the room temperature data interval
    # e.g. for a 10 minute room temperature data interval this will be 10 loop cycles (0...9)
    for x in range (9):
        #n = 1
        q1 = L0 * (tr-t1) + L1 * (t2-t1) # W/(K m²) * K = W/m²
        q2 = L1 * (t1-t2) + L2 * (t3-t2)
        q3 = L2 * (t2-t3) + L3 * (t4-t3)
        q4 = L3 * (t3-t4) + L4 * (t5-t4)
        q5 = L4 * (t4-t5)

        t1 = t1 + (q1/C1 * DT) # W/m² * m² K/(W sec) * s = K
        t2 = t2 + (q2/C2 * DT)
        t3 = t3 + (q3/C3 * DT)
        t4 = t4 + (q4/C4 * DT)

```

```
t5 = t5 + (q5/C5 * DT)

return t5

# for control applications best use a 24 hour running mean of t5 / the thermal condition, in order to
# smooth out the slight diurnal cyle}
```


B. Regelung der Wärmerückgewinnung, bevorzugte Variante

Ein Code-Beispiel (Python) für die Logik einer Regelung der Wärmerückgewinnung in Lüftungsgeräten für PASSIVHAUS-Gebäude. Die saisonale Anpassung des Regelungsverhaltens erfolgt über den thermischen Zustand des Gebäudes.

```
# Passivhaus Institut GmbH, Wolfgang Hasper, 2026

# This program is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of
# the GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either
# version 3 of the License, or (at your option) any later version.
# This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY WARRANTY;
# without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.
# See the GNU General Public License for more details.
# You should have received a copy of the GNU General Public License along with this program.
# If not, see <https://www.gnu.org/licenses/>.
# A mock-up of heat recovery (HR) controls suitable for application in MVHR for Passivhaus buildings.
# This code snippet can be used as a template for the actual control logic but as-is is only intended
# to highlight the algorithms and interactions / cases.

# intended to be run cyclic every one minute

# constants
NEUTRAL_WARM = 22.5
MIN_SUP = 16.5
MAX_ROOM = 25.0

# input variables
# main governor is the Thermal Condition of the building [°C] measured in the core
# of the structure or calculated from measured room temperatures
thC = 22.0
# auxiliary governors are supply air temperature (sup), outdoor air temperature (oda)
# and extract air temperature (eta), [°C]
sup = 19.5
oda = 12.0
eta = 23
# EDIT the above values to study the controller output for certain sets of boundary conditions
# In a real-world application these quantities are, of course, continuously measured.

# output variables
# initialised to pragmatic values on startup:
heatRecoveryPercent : int = 100
heatRecoveryComfort : int = 0

# loop the controller a few times to illustrate behaviour.
# This FOR loop is not applicable in the normal, cyclic controller.
for x in range (110):
```

B. Regelung der Wärmerückgewinnung, bevorzugte Variante

```
# full HR while building is not warm:
if thC < NEUTRAL_WARM and eta <= MAX_ROOM:
    heatRecoveryPercent = 100

# cover the unlikely event that eta temperature (as proxy of instant room temperature) rises
# beyond comfortable range in the winter, as might happen with exceptionally much free heat.
# simple linear control should do (more sophisticated optional):
elif thC < NEUTRAL_WARM and eta > MAX_ROOM:
    heatRecoveryPercent -= 1

# no HR once the building is warm:
elif thC >= NEUTRAL_WARM and oda <= eta:
    heatRecoveryPercent = 0

# employ HR when it is hot outside to reduce ventilation heat load:
elif thC >= NEUTRAL_WARM and oda > eta:
    heatRecoveryPercent = 100

# finally, always ensure a minimum sup temperature, for comfort reasons,
# again a simple linear control should suffice (more sophisticated optional):
if sup < MIN_SUP:
    heatRecoveryComfort +=1

# HR cannot rise beyond 100% or below 0%
if heatRecoveryPercent > 100:
    heatRecoveryPercent = 100
elif heatRecoveryPercent < 0:
    heatRecoveryPercent = 0
if heatRecoveryComfort > 100:
    heatRecoveryComfort = 100
elif heatRecoveryComfort < 0:
    heatRecoveryComfort = 0

# comfortable SUP temperature takes priority:
if heatRecoveryComfort > heatRecoveryPercent:
    heatRecoveryPercent = heatRecoveryComfort

# now the value of heatRecoveryPercent is our desired output:
print (heatRecoveryPercent)
```

C. Regelung der Wärmerückgewinnung, alternative Variante

Ein Code-Beispiel (Python) für die Logik einer Regelung der Wärmerückgewinnung in Lüftungsgeräten für PASSIVHAUS-Gebäude. Die saisonale Anpassung des Regelungsverhaltens erfolgt im Wesentlichen über ein gleitendes Mittel der Außentemperatur und die Ablufttemperatur.

```
# Passivhaus Institut GmbH, Wolfgang Hasper, 2026

# This program is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of
# the GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either
# version 3 of the License, or (at your option) any later version.
# This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY WARRANTY;
# without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.
# See the GNU General Public License for more details.
# You should have received a copy of the GNU General Public License along with this program.
# If not, see <https://www.gnu.org/licenses/>.

# A mock-up of heat recovery (HR) controls suitable for application in MVHR for Passivhaus buildings.
# This code snippet can be used as a template for the actual control logic but as-is is only intended
# to highlight the algorithms and interactions / cases.

# intended to be run cyclic every one minute

# constants
ETA_MAX = 23
SUP_MIN = 16.5

# input variables
# one governor is the 24-h running mean of the outdoor temperature
meanOutTemp = 13
# auxiliary governors are supply air temperature (sup), outdoor air temperature (oda)
# and extract air temperature (eta), [°C]
sup = 18
oda = 9.0
eta = 21.4
# EDIT the above values to study the controller output for certain sets of boundary conditions
# In a real-world application these quantities are, of course, continuously measured.

# output variables
# initialised to pragmatic values on startup:
heatRecoveryPercent : int = 100
heatRecoveryComfort : int = 0

# loop the controller a few times to illustrate behaviour.
# This FOR loop is not applicable in the normal, cyclic controller.
for x in range (110):
```

C. Regelung der Wärmerückgewinnung, alternative Variante

```
# full HR while building is not warm and cold weather prevails:
if eta < ETA_MAX and meanOutTemp <= 16.5:
    heatRecoveryPercent = 100

# cover the unlikely event that eta temperature (as proxy of instant room temperature) rises
# beyond comfortable range in the winter, as might happen with exceptionally much free heat.
# simple linear control should do (more sophisticated optional):
elif eta > ETA_MAX:
    heatRecoveryPercent -= 1

# employ HR when it is hot outside to reduce ventilation heat load:
if meanOutTemp > 16.5 and oda > eta:
    heatRecoveryPercent = 100

# finally, always ensure a minimum sup temperature, for comfort reasons,
# again a simple linear control should suffice (more sophisticated optional):
if sup < SUP_MIN:
    heatRecoveryComfort +=1

# HR cannot rise beyond 100% or below 0%
if heatRecoveryPercent > 100:
    heatRecoveryPercent = 100
elif heatRecoveryPercent < 0:
    heatRecoveryPercent = 0
if heatRecoveryComfort > 100:
    heatRecoveryComfort = 100
elif heatRecoveryComfort < 0:
    heatRecoveryComfort = 0

# comfortable SUP temperature takes priority:
if heatRecoveryComfort > heatRecoveryPercent:
    heatRecoveryPercent = heatRecoveryComfort

# now the value of heatRecoveryPercent is our desired output:
print (heatRecoveryPercent)
```

D. Regelung der Vorlauftemperatur

Ein Code-Beispiel (Python) für die Logik einer Vorlauftemperaturregelung für Heizen und Kühlen PASSIVHAUS-Gebäuden.

```
# Passivhaus Institut GmbH, Wolfgang Hasper, 2026

# This program is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of
# the GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either
# version 3 of the License, or (at your option) any later version.
# This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY WARRANTY;
# without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.
# See the GNU General Public License for more details.
# You should have received a copy of the GNU General Public License along with this program.
# If not, see <https://www.gnu.org/licenses/>.

# A mock-up of the logic for flow temperature setpoints suitable for Passivhaus buildings.
# This code snippet can be used as a template for the actual control logic but as-is is only intended
# to highlight the algorithms and interactions / cases.

'''
modes of operation as per Thermal Condition:

0, Stand-by (Vacation)      17.2 (17.4) Heating enable

1, Heating                  20.4 (20.6) Heating enable

2, Neutral Cool             20.6 Shading open, MVHR operating

3, Neutral Warm             22.5 (22.3) Shading closed at 150 W/m2
                             MVHR bypass at ODA < ETA

4, Passive Cooling          23.5 (23.3) Night ventilation enable,
                             Shading closed at 150 W/m2
                             MVHR bypass at ODA < ETA

5, Active Cooling           24.5 (24.4) Cooling enable
                             Shading closed at 150 W/m2
                             MVHR bypass at ODA < ETA

'''
tank = 22.5 # setpoint neutral init value
# EDIT the following to play around
thC = 20.0 # current Thermal Condition
mode = 1 # manual setting here for demonstration

# stand-by mode
if mode == 0:
    tank_min = 30.0
    tank_max = 45.0
    thC_min = 16.5
    thC_max = 17.4

    tank = (( tank_min - tank_max) / (thC_max - thC_min)) * (thC - thC_min) + tank_max

    if tank > tank_max: # cap temp, for safety
```

D. Regelung der Vorlauftemperatur

```
tank = tank_max
elif tank < thC_min:
    tank = thC_min

# heating mode
if mode == 1:
    tank_min = 30.0
    tank_max = 55.0
    thC_min = 17.2
    n = 1.33 # heater exponent
    P = 0 # parallel shift
    S = 2 # slope
    roomT = 20.0 # room temp setpoint

    # linear control
    tank = (( tank_min - tank_max) / (thC_max - thC_min)) * (thC - thC_min) + tank_max

    # classic exponential control
    tank = roomT + P + (S * ((tank_max - roomT) * ((roomT - thC) / (roomT - thC_min)) ** (1/n) ))

    if tank > tank_max: # cap temp
        tank = tank_max
    elif tank < tank_min:
        tank = tank_min

# neutral modes
if mode > 1 and mode < 5:
    tank = thC # neutral value; better switch off systems!

# cooling mode
if (mode == 5):
    tank_min = 12.0
    tank_max = 18.0
    thC_min = 24.5
    thC_max = 25.5

    tank = (( tank_max - tank_min ) / ( thC_min - thC_max )) * (thC - thC_min) + tank_max

    if tank < tank_min: # cap temp
        tank = tank_min
    elif tank > thC_max:
        tank = thC_max

print("The flow temperature setpoint is :",round(tank,2)," °C")
```

E. Steuerung einer asymmetrischen Wärmepumpenkaskade

Ein Code-Beispiel (Python) für die Logik einer Steuerung einer asymmetrischen Wärmepumpenkaskade aus zwei Geräten für PASSIVHAUS-Gebäude.

```
# Passivhaus Institut GmbH, Wolfgang Hasper, 2026

# This program is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of
# the GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either
# version 3 of the License, or (at your option) any later version.
# This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY WARRANTY;
# without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.
# See the GNU General Public License for more details.
# You should have received a copy of the GNU General Public License along with this program.
# If not, see <https://www.gnu.org/licenses/>.

# A mock-up of the logic for asymmetric heat pump controls suitable for Passivhaus buildings.
# This code snippet can be used as a template for the actual control logic but as-is is only intended
# to highlight the algorithms and interactions / cases.

# intended to be run cyclic every one minute

# constants
# heat pump rated thermal output, inverter controlled 100...25%
HP1MAX = 20 # kW
HP2MAX = 10 # kW
LOADCAPFACTOR = 0.85 # prefer loading slightly below max

hp1Percent = 0.0
hp2Percent = 0.0

powerDemand = 18
# kW or equivalent flow temperature in a real system, EDIT to play around

if powerDemand <= HP2MAX * LOADCAPFACTOR:
    hp1Percent = 0
    hp2Percent = powerDemand / HP2MAX * 100

if powerDemand > HP2MAX * LOADCAPFACTOR and powerDemand <= HP1MAX * LOADCAPFACTOR:
    hp1Percent = powerDemand / HP1MAX * 100
    hp2Percent = 0

if powerDemand > HP1MAX * LOADCAPFACTOR and powerDemand <= HP1MAX * LOADCAPFACTOR + HP2MAX * LOADCAPFACTOR:
    hp1Percent = HP1MAX * LOADCAPFACTOR / HP1MAX * 100
    hp2Percent = (powerDemand - HP1MAX * LOADCAPFACTOR) / HP2MAX * 100
    if hp2Percent < 25:
        hp2Percent = 25
    hp1Percent = (powerDemand - HP2MAX * hp2Percent / 100) / HP1MAX * 100

if powerDemand > HP1MAX * LOADCAPFACTOR + HP2MAX * LOADCAPFACTOR:
    hp1Percent = 100
```

E. Steuerung einer asymmetrischen Wärmepumpenkaskade

```
hp2Percent = (powerDemand - HP1MAX) / HP2MAX * 100

print("hp1Percent: ")
print(hp1Percent)

print("hp2Percent: ")
print(hp2Percent)
```