

Energetische Flexibilität durch Nutzung der thermischen Gebäudemasse

Monika Hall, Caroline Hoffmann, Achim Geissler
Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau, Hofackerstrasse 30,
4132 Muttenz, monika.hall@fhnw.ch, www.fhnw.ch

Zusammenfassung

Résumé

Abstract

Aufgrund der Preisentwicklung von Strom wird es immer attraktiver, den Stromertrag der lokalen Photovoltaikanlage direkt vor Ort zu nutzen. Hierzu eignen sich grosse Strombezüger, die während der Tagesstunden Strom beziehen können, wie z.B. Wärmepumpen. Ziel ist es, die Laufzeit der Wärmepumpe auf den Tag zu beschränken. Je geringer die notwendige Laufzeit ist, desto grösser wird die Flexibilität hinsichtlich der Wahl der Laufzeitfenster. Es werden ein Mehrfamilienhaus (Fussbodenheizung) und ein Bürogebäude (Betonkernaktivierung in der Decke) untersucht.

Beide untersuchten Gebäudetypen zeigen, dass die thermische Gebäudemasse ein wichtiger Bestandteil im Rahmen der energetischen Flexibilität ist. Es lässt sich aus den durchgeführten Untersuchungen ableiten, dass diese Flexibilität im Wohnbereich besser als im Bürobau zu nutzen ist, da im Bürobau die internen Lasten eine sehr grosse Rolle spielen. Im Winter wirken sich hohe interne Lasten positiv auf die Flexibilität aus, es sind kürzere Laufzeiten der Wärmepumpe (Heizmodus) möglich. Im Sommer verlängern hohe interne Lasten die Laufzeiten der Wärmepumpe (Kühlmodus), da mehr bzw. länger gekühlt werden muss.

Due to the price development of electricity the direct use of on-site generated electricity gets increasingly attractive. By using large consumers in daytime only, self-consumption can be increased quite naturally. For this purpose, heat pumps are well suited. The aim is to limit the run-time schedule of the heat pump to the daytime hours. The shorter the run-time schedule the greater the flexibility in terms of the choice of the run-time window. An apartment building (floor heating) and an office building (concrete core activation in the ceiling) are investigated.

Both building types show that thermal mass plays a major role in terms of flexibility. The flexibility's usability is more pronounced for the apartment building than for the office building. This is mainly due to the high internal loads in office buildings. High internal loads support the flexibility in winter and help reduce the necessary run-time hours of the heat pump. In summer, however, high internal loads increase the cooling load and thus lead to a lower flexibility.

1. Ausgangslage

Infolge sinkender Einspeisetarife und auch zur Netzentlastung bietet es sich an, den Stromertrag von lokalen Photovoltaikanlagen direkt vor Ort zu verbrauchen. Hierzu eignen sich grosse Strombezügler, die auch während des Tages laufen können. Der Einsatz von Wärmepumpen ist in diesem Zusammenhang sinnvoll, da sie zum Heizen und Kühlen, sowie zur Warmwasserbereitung eingesetzt werden können. Optimal für die Eigenverbrauchsrate ist es, wenn die notwendige Laufzeit der Wärmepumpe möglichst gering ist. Dies bietet die grösste Flexibilität hinsichtlich der Wahl der Laufzeitfenster. Ziel ist es, den Betrieb der Wärmepumpe auf Stunden mit Solarertrag zu limitieren, ohne Komforteinbussen hinnehmen zu müssen. Vereinfachend wird in den Simulationen angenommen, dass dies tagsüber immer der Fall ist (kein Abschalten der Heizung an strahlungsarmen Tagen). Dieses Vorgehen ist jedoch nur dann möglich, wenn die verfügbare thermische Masse des Gebäudes aktiviert werden kann.

Vorliegender Beitrag stellt die Ergebnisse aus Untersuchungen an einem Mehrfamilienhaus und an einem Bürogebäude vor. Die notwendigen Wärmepumpenlaufzeiten werden auf Grund der thermischen Behaglichkeit bestimmt. Beide Gebäude werden mit einer detaillierten thermischen Gebäudesimulation untersucht. Die Nutzung wird gemäss SIA 2024 festgelegt.

Da mit dem Mehrfamilienhaus und dem Bürogebäude zwei unterschiedliche Nutzungen betrachtet werden, ist der Fokus bei beiden Gebäuden etwas unterschiedlich. Bei dem Mehrfamilienhaus liegt der Schwerpunkt auf der Gebäudehülle, der Bauweise und der Leistung der Wärmepumpe. Bei dem Bürogebäude werden die internen Lasten, die Vorlauftemperatur, der Massenstrom und der Luftwechsel für die Nachtlüftung variiert. Im Mehrfamilienhaus wird die Wärmepumpe nur zum Heizen eingesetzt, während im Bürogebäude neben dem Heizen auch die Kühlung von Interesse ist. Bei beiden Gebäuden muss der Komfort gewährleistet sein.

2. Grundlagen

2.1 Methodik

Um die Flexibilität für die Wärmepumpenlaufzeit für das Mehrfamilienhaus mit Fussbodenheizung zu bestimmen, wird für verschiedene Wärmespeicherfähigkeiten, Wärmepumpengrössen und Heizwärmebedarfswerte die minimale Wärmepumpenlaufzeit als Blockzeit bestimmt. Dabei darf in keiner Wohnung und zu keiner Zeit die empfundene Temperatur unter 20 °C fallen, d.h., der Komfort ist die beschränkende Grösse. Simuliert und ausgewertet werden die Monate Januar und Februar (Klima Buchs-Aarau). Dies sind die Monate mit den tiefsten Aussenlufttemperaturen. Es wird berücksichtigt, dass die Wärmepumpe am Mittag für eine Stunde das Warmwasser bereitet und nicht für Heizzwecke zur Verfügung steht.

Beim Bürogebäude wird die energetische Flexibilität durch Aktivierung der thermischen Masse mit Betonkernaktivierung (BKT) untersucht. Über die BKT in der Decke wird mit einer Wärmepumpe im Winter geheizt und im Sommer gekühlt. Für den kältesten (Januar) und wärmsten Monat (Juli) im Jahr (Klima Zürich) wird untersucht, ob die Laufzeit der Wärmepumpe auf die Tagesstunden limitiert werden kann. Folgende Fragestellungen werden bei diesem Gebäudetyp untersucht:

- Wie viele Übertemperaturstunden > 26.5 °C im Sommer bzw. Untertemperaturstunden < 20 °C im Winter treten auf, wenn nur tagsüber in definierten Zeitfenstern geheizt/gekühlt wird?
- Muss auch am Wochenende geheizt/gekühlt werden?
- Welchen Einfluss auf den sommerlichen Komfort hat eine zusätzliche Nachtlüftung?

Es werden verschiedene Varianten mit z.B. unterschiedlichen Laufzeiten der Wärmepumpe, Höhe der internen Lasten oder Variation der Vorlauftemperatur betrachtet. Ausgewertet werden im Untersuchungsmonat jeweils die empfundenen Temperaturen während der Nutzungszeit: Mo-Fr, 8⁰⁰-18⁰⁰Uhr, dies entspricht 230 h Nutzungsstunden pro Monat mit 31 Tagen.

Für beide Gebäude werden die thermischen Gebäudesimulationen mit dem Programm «ESP-r» [1] durchgeführt. Es wird jeweils eine Vorlaufzeit von 60 Tagen berücksichtigt, damit das Gebäude zu Beginn der Betrachtungsperiode thermisch eingeschwungen ist.

2.2 Tageslänge

Die Stunden mit Solarertrag sind durch die Tageslänge bestimmt. Die Tageslänge definiert sich aus der Differenz zwischen der Uhrzeit für Sonnenaufgang und Sonnenuntergang. Aus Abbildung 1 ist für den Standort Zürich ersichtlich, dass die kürzeste Tageslänge 8:26 h (17.-25.12.) und die längste Tageslänge 15:58 h (16.-25.06) beträgt. Der Median ergibt sich zu 12:17 h. Die kürzeste Laufzeit für die Wärmepumpe in den Tagesstunden kann für die Monate Dezember und Januar von ca. 8⁰⁰-17⁰⁰ Uhr angenommen werden. Dies sind neun Stunden, wobei in dieser Zeitspanne auch das Warmwasser erzeugt werden muss. Im Sommer stehen in den wärmsten Monaten Juli/August Tageslängen von rund 15 h (ca. 6⁰⁰-21⁰⁰ Uhr) für Solarertrag zur Verfügung. Das unterschiedliche Strahlungsangebot innerhalb der Tageslänge wird nicht berücksichtigt.

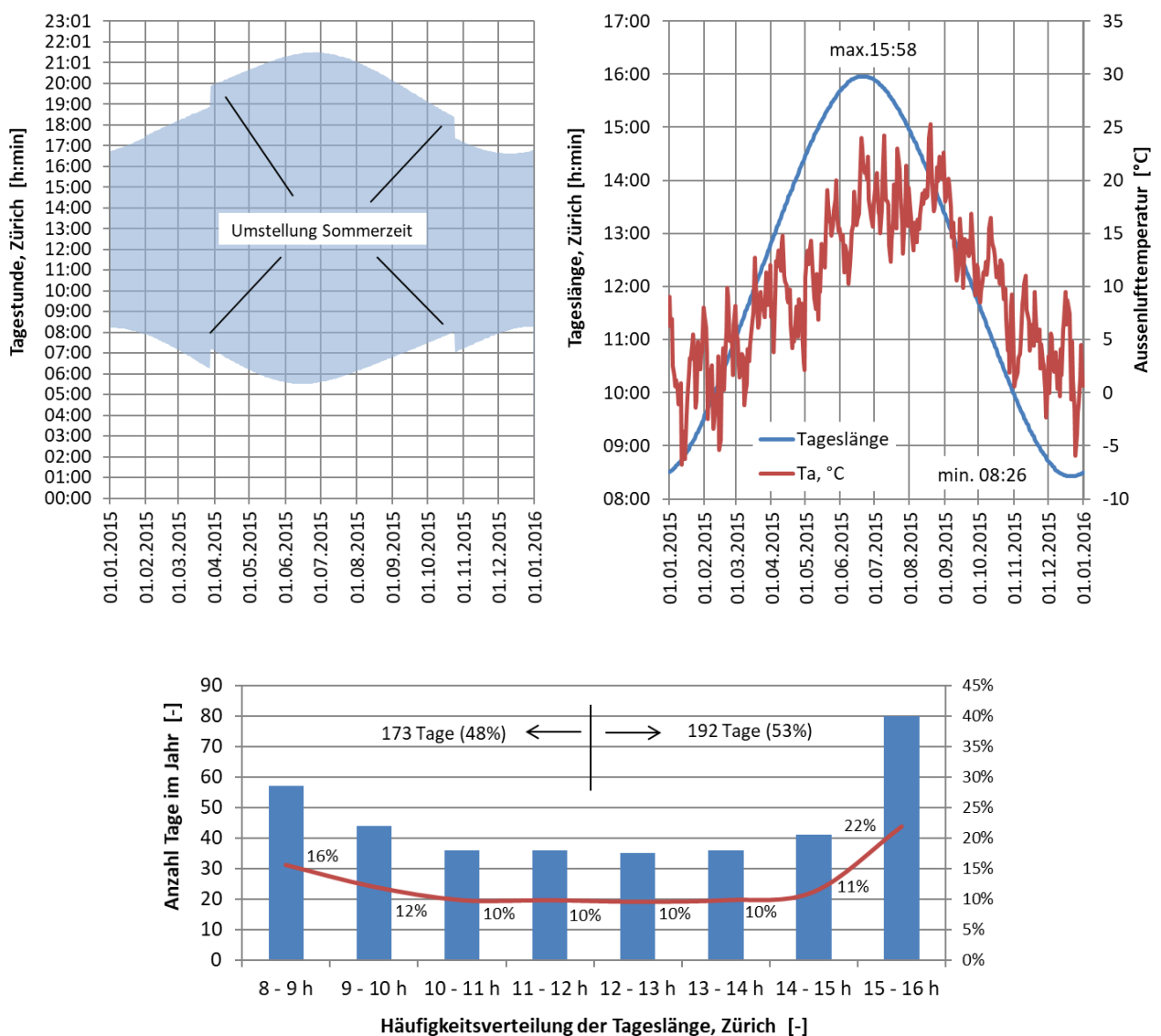


Abbildung 1 Tagesstunden, Tageslänge und Häufigkeitsverteilung der Tageslängen von Zürich (Tageslängen [2], Aussenlufttemperaturen [3]).

3. Beispielgebäude

3.3 Geometrie und Konstruktion

Das untersuchte Mehrfamilienhaus hat eine Energiebezugsfläche (EBF) von 320 m². Diese teilt sich auf in zwei gleich grosse Wohnungen im Erd- und Obergeschoss und ein kleines Studio im Keller (Abbildung 2). Das Gebäude ist in Massivbauweise erbaut (Böden und Dach in Beton, Aussenwände in Porenbeton, Innenwände Kalksandstein/Gipskarton) und ist Minergie-P zertifiziert. Es verfügt über eine Wärmepumpe mit 8.9 kW (B0/W35), eine Fussbodenheizung, eine Komfortlüftungsanlage mit 80% Wärmerückgewinnung und eine Photovoltaikanlage mit 20 kW_p (Süd, 10°). Weitere Informationen zum Gebäude, zum Simulationsmodell und zu ersten Ergebnissen bzgl. der limitierten Wärmepumpenlaufzeiten in Zusammenhang mit der Wärmespeicherfähigkeit können [4] und [5] entnommen werden. Die Einrichtung wird mit einer Speichermasse von 36 kg/m²_{EBF} berücksichtigt (eigene Berechnung). Weitere Daten zum Gebäude zeigt Tabelle 1.

Das Bürogebäude ist ebenfalls in massiver Bauweise erstellt und repräsentiert ein Standardbürogebäude. Die Aussenwände sind gemauert, die Decken und aussteifenden Elemente sind aus Beton. Die internen Trennwände bestehen aus Leichtbau (Gipskarton/Mineralfaser). Simuliert wird eine ca. 1'100 m²_{EBF} grosse Büroetage. Die Flächenaufteilung ist wie folgt:

- 62 % der Fläche sind mit Büroarbeitsplätzen belegt (je die Hälfte Einzel- und Grossraumbüros), lichte Masse Einzelbüros: 7.5 m x 4 m x 3 m, Grossraumbüro: 28 m x 11 m x 3 m
- 27 % der Fläche werden für Nebenräume (WC, Teeküche, Technik) und
- 10 % werden als Verkehrsfläche genutzt.

Die Flächenverteilung auf Büro-, Flur-, und Nebenflächen entspricht den in VDI 3807 [6] angegebene mittleren Flächenverhältnissen für Verwaltungsgebäude (Abbildung 3). Die Geschosshöhe beträgt 3.3 m. Die Abmessungen für das gesamte Gebäude mit fünf Stockwerken betragen: 91 m x 12 m x 16.5 m (LxBxH). Für die Einrichtung werden als Speichermasse 38 kg/m²_{EBF} berücksichtigt [7]. Tabelle 1 enthält weitere Daten zum Gebäude.



Abbildung 2 Ansichten des Mehrfamilienhauses.

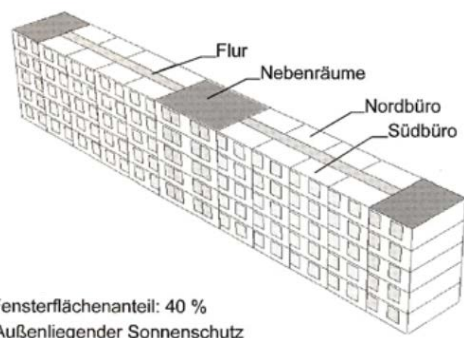
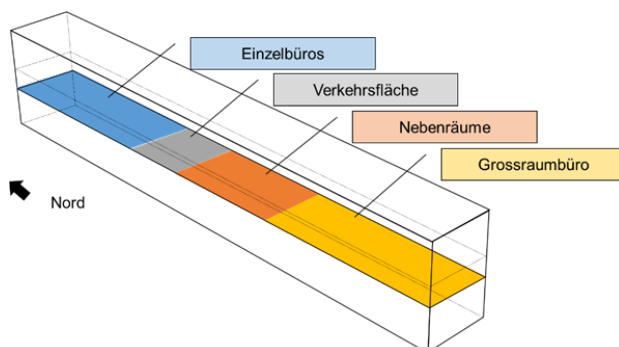


Abbildung 3 Schemazeichnung des Bürogebäudes (analog [8]).

Tabelle 1: Daten zum Mehrfamilienhaus und dem Bürogebäude (U-Werte ohne Wärmebrücken).
 * berechnet nach [9], EZ = Einzelbüro, GR = Grossraumbüro, NGF = Nettogeschossfläche.

Parameter	Mehrfamilienhaus	Bürogebäude
U-Wert, Aussenwand	0.12 W/(m ² K)	0.17 W/(m ² K)
U-Wert, Dach	0.09 W/(m ² K)]	0.17 W/(m ² K)]
U-Wert, Fenster	0.75 W/(m ² K)	0.61 W/(m ² K)
g-Wert, Glas	50 %	50 %
Fensteranteil	23 %	40 %
Sonnenschutzsteuerung	immer offen	>180 W/m ² offen, < 150 W/m ² geschlossen (Lamellen horizontal)
Verschattung durch Nachbargebäude	ja	nein
Spez. Wärmespeicherfähig. (mit R _{si}) *	63 Wh/(m ² _{NGF} K)	50 (GR) /62 (EZ) Wh/(m ² _{NGF} K)
Luftwechsel	0.39 h ⁻¹	0.308 (GR) /0.246 (EZ) h ⁻¹
Klimastation [10]	Buchs-Aarau	Zürich

3.4 Betrieb

Bei dem Mehrfamilienhaus entsprechen die internen Lasten für Geräte, Personen und Beleuchtung SIA 2024:2006 [11]. Abbildung 4 zeigt das Tagesprofil der internen Lasten für die Monatsgleichzeitigkeit von 100%. Weitere Angaben zu den internen Lasten sind in Tabelle 2 enthalten. Die Vorlauftemperatur der Fussbodenheizung wird auf 35 °C festgelegt. Es wird geheizt, wenn die Temperatur im Wandthermostat des jeweiligen Raumes unter 21.5 °C fällt. Der Sonnenschutz ist immer offen.

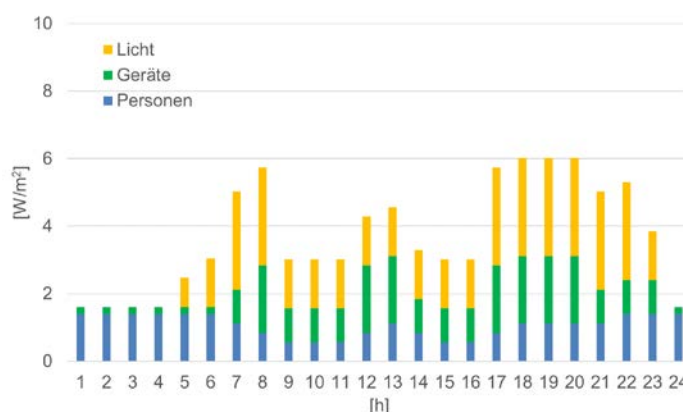


Abbildung 4 Stundensprofil der internen Lasten für das Mehrfamilienhaus gemäss SIA 2024:2006 «Standard».

Die internen Lasten für das Bürogebäude sind für alle Räume entsprechend der Nutzung gemäss SIA 2024:2015 [12] angesetzt (Tabelle 2). Die Anzahl der Beleuchtungsstunden wird ebenfalls angepasst. Nach Norm müsste die Beleuchtung 11 h pro Tag zu 100 % in Betrieb sein. Es wird angenommen, dass im Winter über die Mittagsstunden (11⁰⁰-14⁰⁰ Uhr) die Beleuchtung nicht in Betrieb ist, da genügend Tageslicht zur Verfügung steht. Im Sommer wird davon ausgegangen, dass nur jeweils eine Stunde am Morgen und am Abend 50 % der Beleuchtung in Betrieb sind und zu den restlichen Zeiten genügend Tageslicht zur Verfügung steht (Abbildung 5, Abbildung 6).

Die gesamte Deckenfläche ist mit BKT ausgeführt. Im Winter beträgt die Vorlauftemperatur 35 °C. Fällt die Raumlufftemperatur unter 20 °C wird geheizt. Im Sommer ist die Vorlauftemperatur 18 °C und bei einer Raumlufftemperatur über 26 °C (bzw. 24 °C) wird gekühlt. Warmwasserbereitung wird nicht berücksichtigt, da in Bürogebäude i.d.R. sehr wenig Warmwasser benötigt wird. Die Lüftung erfolgt über eine Lüftungsanlage mit 80 % Wärmerückgewinnung. Der Aussenluftvolumenstrom wird in der Simulation entsprechend reduziert.

Der aussenliegenden Lamellenraffstoren wird strahlungsabhängig gesteuert und ist auch am Wochenende in Betrieb:

- Einstrahlung auf Fassade > 180 W/m² => der Sonnenschutz wird heruntergefahren und
- Einstrahlung auf Fassade < 150 W/m² => der Sonnenschutz wird geöffnet.

Die Lamellen liegen im heruntergefahrenen Zustand horizontal. Dies ist ein Kompromiss zwischen Tageslichtnutzung und Verschattung.

Tabelle 2: Angaben zu internen Lasten gemäss SIA 2024:2006* bzw. 2015 (Bezug NGF).

	Personen [W/P]	Personenfläche [m ² /pro Person]	Geräte [W/m ²]	Beleuchtung [W/m ²]	Total [W/m ²]
Wohnen*	70	50	2	4	7.4
Grossraumbüro	70	10.2	10	12.5	29.3
Einzelbüro	70	14	7	15.9	27.6

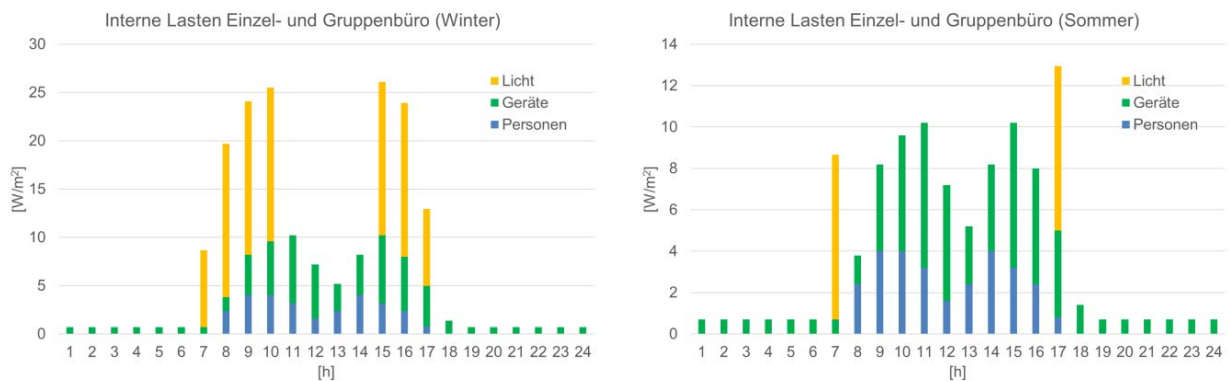


Abbildung 5 Verwendetes Stundenprofil der internen Lasten Einzelbüro (links Winter, rechts Sommer), Geräte und Personen gemäss SIA 2024:2015, Licht modifiziert.

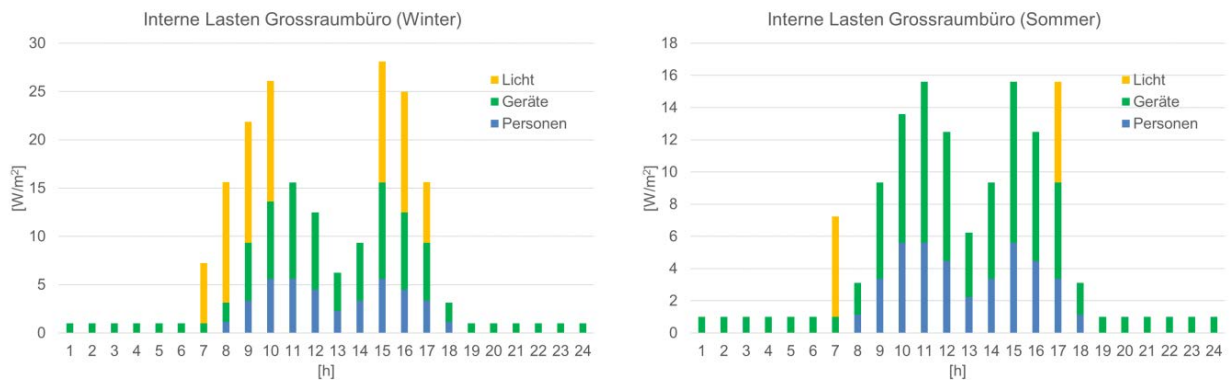


Abbildung 6 Stundenprofil der internen Lasten Grossraumbüro (links Winter, rechts Sommer) Geräte und Personen gemäss SIA 2024:2015, Licht modifiziert.

4. Resultate

4.1 Mehrfamilienhaus

Um die mögliche Flexibilität bei der Wärmepumpenlaufzeit zu bestimmen, wird für verschiedene Wärmespeicherfähigkeiten, Wärmepumpengrössen und Heizwärmebedarfswerte die minimale Wärmepumpenlaufzeit berechnet. Um den Komfort zu gewährleisten, dabei darf in keiner Wohnung die empfundene Temperatur unter 20 °C fallen. Bei den verschiedenen Varianten zeigt sich, dass die Wohnung im Obergeschoss i.d.R. die Laufzeit der Wärmepumpe limitiert, da dort als erstes empfundene Temperaturen zwischen 19-20 °C auftreten.

An der Klimastation Buchs-Aarau sind die gewählten zwei Monate die Monate mit den tiefsten Aussenlufttemperaturen. Die Tageslänge nimmt im genannten Zeitraum von achteinhalb auf 11 Stunden zu. D.h., im Hochwinter sollte für Heizung und Warmwasser die Wärmepumpenlaufzeit insgesamt ca. acht Stunden nicht überschreiten. Bei allen Varianten wird davon ausgegangen, dass mittags zwischen 13⁰⁰-14⁰⁰ Uhr die Wärmepumpe das Warmwasser bereitet. Die Laufzeit für die Wärmepumpe für Heizzwecke wird um die "Warmwasserzeit" gruppiert, d.h. die Laufzeit ist eine Blockzeit mit einer einstündigen Unterbrechung am Mittag. Generell wird im Folgenden nur die Laufzeit der Wärmepumpe für Heizzwecke angegeben. Für die Gesamtlaufzeit muss immer die Stunde für die Warmwasserbereitung dazu addiert werden.

In Abbildung 7 ist die Wärmepumpenlaufzeit (y-Achse) in Abhängigkeit von der Wärmespeicherfähigkeit (x-Achse), dem Heizwärmebedarf (Farbe) und der Wärmepumpenleistung (Linien durchgezogen, gestrichelt) zusammengestellt. Den grössten Einfluss auf die Wärmepumpenlaufzeit hat der Heizwärmebedarf.

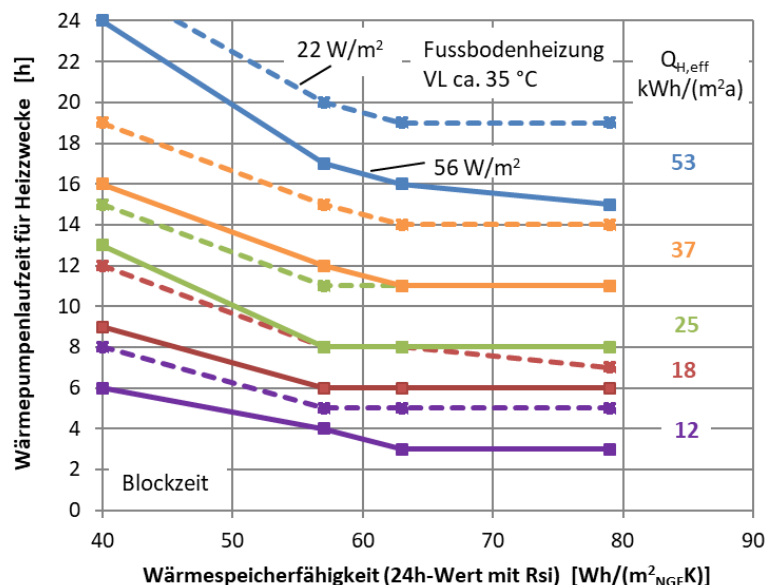


Abbildung 7 Laufzeiten (Blockzeiten) für die Wärmepumpe für Heizzwecke vs. der Wärmespeicherfähigkeit [9] (mit R_{Si}) in Abhängigkeit von dem Heizwärmebedarf und der spezifischen Nutzleistung der Wärmepumpe.

Bei gleichem Heizwärmebedarf weisen Gebäude mit einer Wärmespeicherfähigkeit grösser ca. 60 Wh/(m²·K) die kürzesten Laufzeiten auf. Unter ca. 60 Wh/(m²·K) steigt die Wärmepumpenlaufzeit linear mit der Abnahme der Wärmespeicherfähigkeit an. Die Steigung nimmt dabei mit dem steigenden Heizwärmebedarf überproportional zu.

Die verfügbare spezifische Leistung der Wärmepumpe macht zwischen zwei und drei Stunden bei der Wärmepumpenlaufzeit aus. Die gewählten spezifischen Leistungen entsprechen den Grenzen üblicher Aggregate für Gebäude dieser Grösse.

Damit auch im Hochwinter mit Tageslängen von acht bis neun Stunden die Wärmepumpe nur auf

die Tagesstunden limitiert werden kann, ist ein sehr gut gedämmtes Gebäude notwendig. Die Wärmepumpenlaufzeit für Heizzwecke muss hierfür bei sieben bis acht Stunden liegen, da noch eine Stunde für die Warmwasserbereitung am Mittag dazugezählt werden muss. Um dies zu gewährleisten, sollten Gebäude eine Wärmespeicherfähigkeit von mindestens ca. 60 Wh/(m² K) und einen maximalen Heizwärmebedarf von ca. 25 kWh/(m² a) aufweisen.

Eine Wärmespeicherfähigkeit von 57 Wh/(m² K) entspricht in etwa der Bauweise «mittel» nach SIA 380/1 [13]. D.h., für Gebäude mit der Bauweise mittel/schwer gemäss [13], einer Fussbodenheizung und niedrigem Heizwärmebedarf kann die Wärmepumpenlaufzeit auf die Tagesstunden limitiert werden.

Um die Ergebnisse für die Praxis handhabbar zu machen, werden die Wärmepumpenlaufzeiten für Heizzwecke für ausgewählte Wärmespeicherfähigkeiten in Abhängigkeit von dem effektiven Heizwärmebedarf aufgetragen (Abbildung 8). Es wird eine mittlere Wärmepumpenleistung angenommen. Mit Hilfe einer Trendlinie kann nun für einen beliebigen Heizwärmebedarf die Wärmepumpenlaufzeit für Heizzwecke berechnet werden.

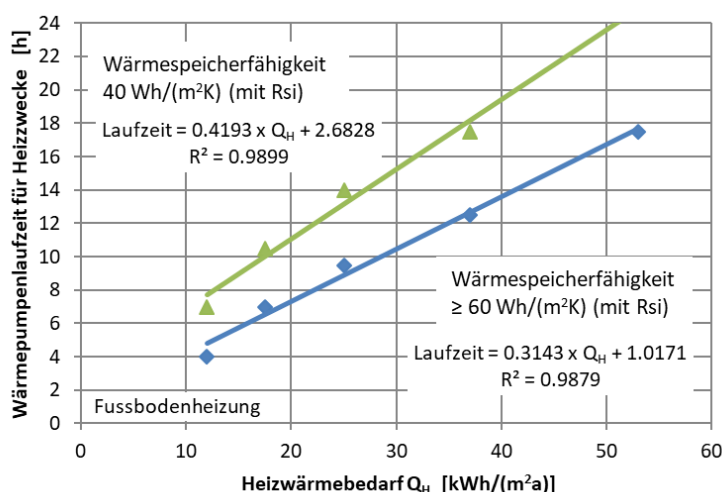
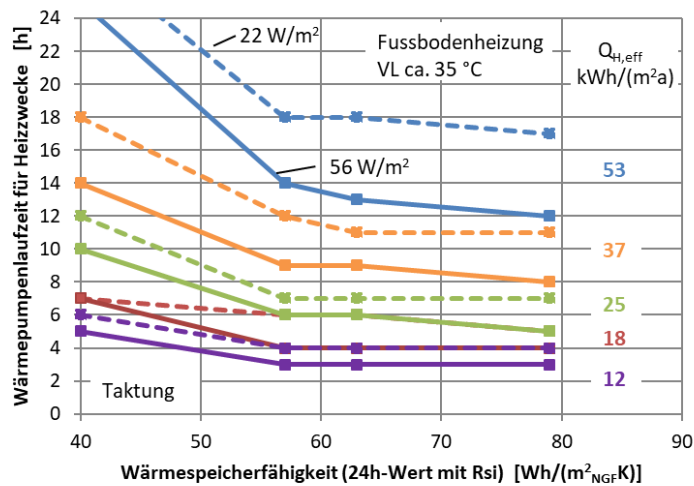


Abbildung 8 Wärmepumpenlaufzeiten (Blockzeit) für Heizzwecke für Wohnen in Abhängigkeit von dem effektiven Heizwärmebedarf und für verschiedene Wärmespeicherfähigkeiten

Im reale Gebäude wurde die Wärmepumpenlaufzeit auf 10⁰⁰–19⁰⁰ Uhr limitiert und ein Heizwärmeverbrauch von 28 kWh/(m²a) gemessenen. Es hat sich beim Monitoring gezeigt, dass diese Blockzeit einschliesslich Warmwasserbereitung ausreicht, um das Gebäude zu beheizen [4]. Mit der realen Wärmespeicherfähigkeit von ca. 63 Wh/(m²K) kann in Abbildung 8 eine Wärmepumpenlaufzeit von rund 10 Stunden für Heizzwecke abgelesen werden. Wird die Stunde für den Warmwasserbetrieb addiert, ergibt dies 11 Stunden Wärmepumpenlaufzeit. In diesem Fall liegt das Diagramm auf der sicheren Seite, da im realen Gebäude neun Stunden einschliesslich Warmwasserbereitung ausreichend sind.

Untersuchungen zu einem Taktbetrieb der Wärmepumpe zeigen, dass bei einer regelmässigen Taktung (Abbildung 9) über den Tag die Laufzeit der Wärmepumpe für Heizzwecke um ein bis zwei Stunden geringer ausfällt, als bei einer Blockzeit. Dies erlaubt Energieunternehmen eine hohe Flexibilität, um auf Über- und Unterlast im Netz zu reagieren, wenn diese die Wärmepumpe hausweise ansteuern könnten. Insgesamt kann aus den Ergebnissen abgeleitet werden, dass die heutigen Sperrzeiten für Wärmepumpen von den Energieunternehmen mit bis zu drei Mal zwei Stunden selbst für weniger gut gedämmte Gebäude kein Problem darstellen. Besser gedämmte Gebäude stellen genügend Flexibilität zur Verfügung, um auch eine Ausweitung der Sperrzeiten zu verkräften.



		Stunde am Tag																								Heizwärmebedarf [kWh/(m ² a)]																			
																										12	18	25	37	53	12	18	25	37	53										
		22 W/m ²												56 W/m ²																															
Gesamtlaufzeit zu Heizzwecken [h]	3																														r, m, h										r, m, h				
	4																														r, m, h										r, m, h				
	5																																			l					m				
	6																														l					r, h					r, h				
	7																																			l									
	8																																								m				
	9																																								r, h				
	10																																								l				
	11																																			r, m									
	12																																			l					h				
	13																																												
	14																																								l				
	17																																								m				
	18																																			l					r, h				

	leicht	hybrid	real	massiv
Cr/A Wh/(m ² K)	40	57	63	79
Abkürzung	l	h	r	m

Abbildung 9 Wärmepumpenlaufzeiten (Taktbetrieb) für Heizzwecke für Wohnen vs. Wärmespeicherfähigkeit [9] (mit R_{si}) in Abhängigkeit von dem effektiven Heizwärmebedarf und der spezifischen Wärmepumpenleistung (grün = Wärmepumpe in Betrieb)

4.2 Bürogebäude

Winter

Für den Winterfall werden die erforderlichen Laufzeiten des Wärmepumpenbetriebes für das Bürogebäude auf Grundlage der folgenden Parametervariationen ermittelt (die Variantenummer «#x» nimmt Bezug auf Tabellen 4 und 5, sowie auf die Abbildungen 10 und 11):

- Laufzeiten der Wärmepumpe (Zeiten am Tag und Betrieb Wochenende) #1-7,11
- Elektrische Beleuchtung von 7⁰⁰-17⁰⁰ Uhr immer an (gemäss SIA 2024), #8
- Elektrische Beleuchtung immer aus, #9
- Vorlauftemperatur erhöht (von 35 °C auf 45 °C), #10

Es ergeben sich 11 Varianten. Bei allen Varianten liegt der Schaltzeitpunkt für die Heizung bei einer Raumlufttemperatur von 20 °C. Es werden die Stunden während der Nutzungszeit (8⁰⁰-18⁰⁰ Uhr) mit einer empfundenen Temperatur < 20 °C summiert und als Anzahl Untertemperaturstunden angegeben. Mit Ausnahme der Variante #10 beträgt die Vorlauftemperatur 35 °C. Einen Überblick über die Ergebnisse der Simulationen zeigt Tabelle 3:

- Für einen guten thermischen Komfort ist der tägliche Betrieb der Heizung notwendig. Wird die Heizung am Wochenende abgeschaltet, kommt es vermehrt zu Untertemperaturstunden. Dies ist auch der Fall, wenn die Heizung nur am Samstag nicht betrieben wird. D.h. es muss auch am Wochenende geheizt werden.
- Zeitfenster ab 8⁰⁰ Uhr sind im Winter als Betriebszeiten zu empfehlen, um die Wärmepumpe möglichst zeitgleich zum Strahlungsangebot zu betreiben. Der Komfort in den Büroräumen ist in dem Zeitfenster 8⁰⁰-17⁰⁰ Uhr (#5) gegeben, jedoch treten in den Nebenräumen und auf den Verkehrsflächen wenige Untertemperaturstunden auf. Die Temperaturen fallen dort jedoch nicht unter 18 °C (Abbildung 10). Abbildung 11 zeigt den Verlauf der empfundenen Temperatur in den Büroräumen in der kältesten Woche im Januar (#5). Das Absinken der empfundenen Temperatur über die Mittagszeit liegt an den internen Lasten, die über Mittag stark reduziert sind (Abbildung 5, Abbildung 6). Temperaturen < 20 °C treten nur ausserhalb der Nutzungszeit von 8⁰⁰-18⁰⁰ Uhr auf und werden daher nicht ausgewertet.
- Die solaroptimierte Wärmepumpenlaufzeit im Winter ist von 9⁰⁰-16⁰⁰ Uhr (#7-10). Der Komfort in den Büros kann hier nur eingehalten werden, wenn entweder die Beleuchtung auch in den Mittagsstunden in Betrieb ist (Annahme: zusätzlich 100 % Beleuchtung 11⁰⁰-14⁰⁰ Uhr gemäss SIA 2024:2015, #8), oder die Vorlauftemperatur von 35 °C auf 45 °C erhöht wird (#10). Die erhöhte Vorlauftemperatur reduziert zwar nur unwesentlich die Untertemperaturstunden (Vergleich #7 und #10), dies ist in diesem Fall aber ausreichend.
- Eine grosse Rolle für den thermischen Komfort im Winter spielen die internen Lasten (Betriebszeit der Heizung 9⁰⁰-16⁰⁰ Uhr, #7-9). Während mit Beleuchtungsstunden nach Norm keine Stunden mit Untertemperaturen auftreten (#8), treten mit reduzierten Beleuchtungsstunden wenige Untertemperaturstunden auf (#7). Ohne Beleuchtung steigt die Anzahl an Untertemperaturstunden auf ca. 22 % der Nutzungszeit (#9).
- Allgemein treten im Grossraumbüro etwas mehr Untertemperaturstunden auf, als in den Einzelbüros. Dies ist auf den etwas höheren spezifischen Luftwechsel zurückzuführen.

Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass die thermische Masse im Winter genügend Flexibilität zur Verfügung stellt, um die Wärmepumpenlaufzeit auf die Tagesstunden beschränken zu können. Einen grossen Einfluss haben die internen Lasten. Wichtig ist, dass das Gebäude auch am Wochenende beheizt wird, um nicht zu stark auszukühlen.

Tabelle 3: Berechnete Untertemperaturstunden im Januar in den Büros mit unterschiedlichen Laufzeiten der Wärmepumpe. Die Vorlauftemperatur beträgt 35 °C (ausser bei #10), der Schalterpunkt für die Heizung liegt bei 20 °C. Die Zahl gibt die Anzahl der Untertemperaturstunden während der Nutzungszeit an (8⁰⁰-18⁰⁰ Uhr, entspricht 230 h im Monat). EZ = Einzelbüros, GR = Grossraumbüro

#	Laufzeit Heizung	Wochentage						Bemerkung
		Mo - So		Mo - Fr		Mo - Fr + So		
		EZ	GR	EZ	GR	EZ	GR	
1	7-14	0	0	15	26	4	4	
2	7-15	0	0	14	22	3	4	
3	7-16	0	0	12	18	3	4	
4	7-17	0	0	12	16	0	0	
5	8-17	0	0	17	27	3	4	
6	9-17	0	1	26	36	6	13	
7	9-16	1	3	29	38	10	16	
8	9-16	0	0	0	8	0	0	el. Bel. 7-17 Uhr
9	9-16	45	47	126	121	76	72	keine el. Bel.
10	9-16	0	0	23	25	2	4	Vorlauf 45°C
11	10-17	1	7	34	46	14	22	

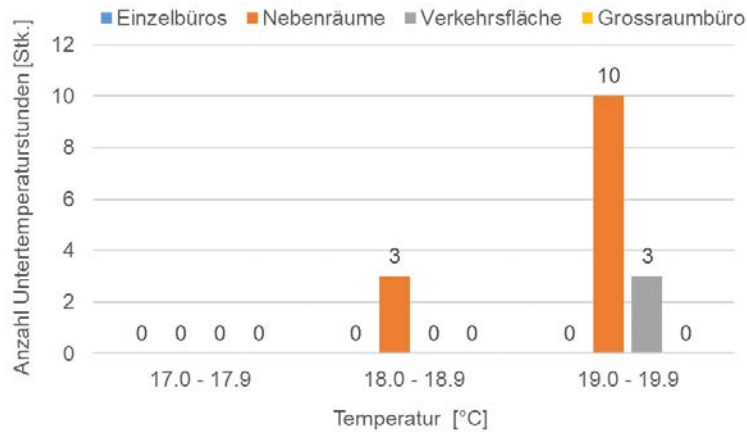


Abbildung 10 Untertemperaturstunden in Temperaturklassen für die Variante #5 (Betrieb Heizung 8⁰⁰-17⁰⁰ Uhr, Vorlauf 35 °C, Schaltpunkt Heizung 20 °C, Nutzungszeit 8⁰⁰-18⁰⁰ Uhr).

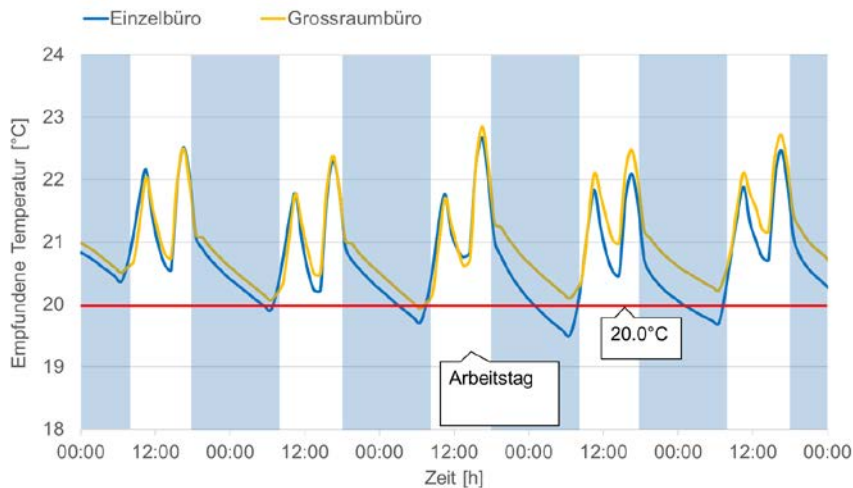


Abbildung 11 Temperaturverläufe vom 11.-15. Januar (kälteste Woche) für die Variante #5 (Betrieb Heizung 8⁰⁰-17⁰⁰ Uhr, Vorlauf 35 °C, Schaltpunkt Heizung 20 °C, Nutzungszeit 8⁰⁰-18⁰⁰ Uhr). Die Temperaturen unterhalb des Schaltpunktes sind Stunden ohne Belegung (blaue Flächen) und werden nicht ausgewertet.

Sommer

Im Sommer treffen sich Strahlungsangebot für die Stromproduktion und der Kühllkältebedarf der Büros zeitlich. Dennoch muss untersucht werden, ob das «solare Zeitfenster» für die Kühlung im Tag ausreichend ist und ob auch längere Unterbrüche der Kühlung (z.B. am Wochenende) möglich sind. Es werden die Stunden während der Nutzungszeit mit einer empfundenen Temperatur > 26.5 °C summiert und als Anzahl Übertemperaturstunden angegeben. Es werden die folgenden Parameter variiert (16 Varianten):

- Laufzeiten der Wärmepumpe (Zeiten am Tag und Betrieb Wochenende) (#1-16)
- Elektrische Beleuchtung immer aus (#4-5)
- Reduktion interne Lasten Geräte um 20 % (#9)
- Nachtlüftung (Luftwechsel 0.5 h⁻¹ und 1.5 h⁻¹) (#6-16)
- Schaltpunkt Kühlung (statt 26 °C abgesenkt auf 24 °C) (#11-16)
- Vorlauftemperatur gesenkt (von 18 °C auf 16 °C) (#3)
- Erhöhung Massenstrom der BKT um 20 % (#15, von 100 l/h auf 120 l/h pro Zone [14])

Tabelle 4 zeigt zusammengefasst die Ergebnisse:

- Ohne Komforteinbussen ist es nicht möglich, die Kühlung durch die Wärmepumpe am Wochenende zu unterbrechen. D.h. die Wärmepumpe muss wie im Winter an sieben Tagen in der Woche laufen.
- Grundsätzlich treten im Grossraumbüro mehr Übertemperaturstunden auf, als in den Einzelbüros. Dies liegt an den höheren spezifischen internen Lasten und dem tieferen spezifischen Luftwechsel.
- Insgesamt reicht eine alleinige Kühlung über die BKT und nur zu Bürozeiten tagsüber nicht aus, um die Wärmelasten abzuführen. Eine Reduktion der Vorlauftemperatur bringt kaum eine Verbesserung (#3). Eine zusätzliche Nachtlüftung mit einem Aussenluftwechsel von 1.5 h^{-1} senkt zwar die Übertemperaturstunden (#8), führt aber erst in Kombination mit um 20 % verringerten Wärmelasten durch Geräte zu einem angenehmen Raumklima (#9).
- Betrachtet man die Übertemperaturstunden im Detail (Abbildung 12, #10), so wird deutlich, dass die meisten Übertemperaturstunden im Bereich von 26.5 bis 27.4 °C auftreten. An wenigen Stunden kann es in den Büros aber bis zu 28.4 °C warm werden und in den Nebenräumen bis zu 30.4 °C. Die höchsten empfundenen Temperaturen treten wie erwartet am Nachmittag auf, morgens liegt die empfundene Temperatur meist unter 26.5 °C (Abbildung 13, #10).
- Da für die Nebenräume keine Nachtlüftung vorgesehen ist, treten hier höhere Temperaturen auf, dies aber nur kurzzeitig (Abbildung 12).
- Grundsätzlich wird ab einer Raumlufttemperatur von $> 26 \text{ °C}$ gekühlt. Wird die Kühlgrenze auf $> 24 \text{ °C}$ herabgesetzt, reduziert dies nicht die Übertemperaturstunden (#8, #11), da die Kühlung im Juli während der Betriebszeiten ohnehin immer in Betrieb ist.
- Eine Reduktion der Übertemperaturstunden ist mit einer Erhöhung des Massenstroms in der BKT um 20 % zu erreichen (#12, #15). Damit kann, sogar mit einer kürzeren Laufzeit der Wärmepumpe, ein fast gleich guter sommerlicher Komfort erreicht werden, wie über eine Reduktion der internen Lasten (keine elektrische Beleuchtung, #14, #15). Bei Erhöhung des Massenstroms muss berücksichtigt werden, dass die Pumpenleistung und i.d.R. auch der Energiebedarf steigen.
- Der beste thermische Komfort ergibt sich bei einer Laufzeit der Wärmepumpe zwischen 6⁰⁰-20⁰⁰ Uhr und Nachtlüftung (#16).

Tabelle 4: Berechnete Übertemperaturstunden im Juli in den Büros mit unterschiedlichen Laufzeiten der Wärmepumpe. Die Vorlauftemperatur beträgt 18 °C (ausser bei #3), der Schalterpunkt für die Kühlung liegt bei 26 °C (ausser bei #11-16). Die Zahl gibt die Anzahl der Untertemperaturstunden während der Nutzungszeit (8⁰⁰-18⁰⁰ Uhr, entspricht 230 h im Monat) an. EZ = Einzelbüros, GR = Grossraumbüros, NL = Nachtlüftung, MS = Massenstrom

#	Laufzeit Kühlung	Wochentage						Bemerkungen
		Mo - So		Mo - Fr		Mo - Fr + So		
		EZ	GR	EZ	GR	EZ	GR	
1	9-17	177	192	231	231	189	208	
2	7-18	31	67	76	124	35	74	
3	7-18	27	63	66	114	31	68	Vorlauf 16°C
4	7-18	41	85					keine el. Beleuchtung
5	9-17	124	184					keine el. Beleuchtung
6	7-18	19	53					NL 18-7 Uhr, 0.5 1/h
7	9-17	67	98					NL 18-7 Uhr, 0.5 1/h
8	7-18	8	20					NL 18-7 Uhr, 1.5 1/h
9	7-18	0	0					NL 18-7 Uhr, 1.5 1/h, Wärmelast Geräte -20%
10	9-17	25	41					NL 18-7 Uhr, 1.5 1/h
11	7-18	8	20					NL 18-7 Uhr, 1.5 1/h, Kühlung ab 24°C
12	8-18	9	18					NL 18-7 Uhr, 1.5 1/h, Kühlung ab 24°C
13	8-18	0	6					NL 18-7 Uhr, 1.5 1/h, Kühl. ab 24°C, keine el. Bel.
14	8-18	0	7					NL 18-7 Uhr, 1.5 1/h, Kühl. ab 24°C, MS +20%
15	6-20	0	0					NL 18-7 Uhr, 1.5 1/h, Kühlung ab 24°C

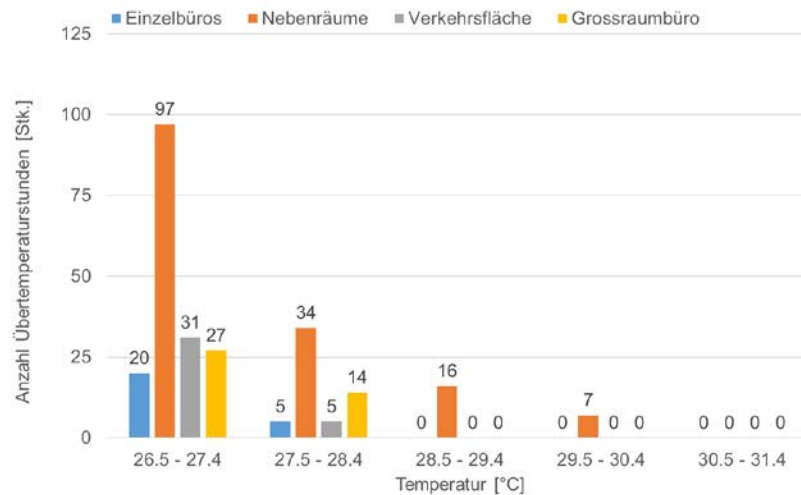


Abbildung 12 Übertemperaturstunden in Temperaturklassen für die Variante #10 (Betrieb Kühlung 9⁰⁰-17⁰⁰ Uhr, Vorlauf 18 °C, Schaltpunkt Kühlung 26 °C, Nachtlüftung 1.5 1/h, Nutzungszeit 8⁰⁰-18⁰⁰ Uhr).

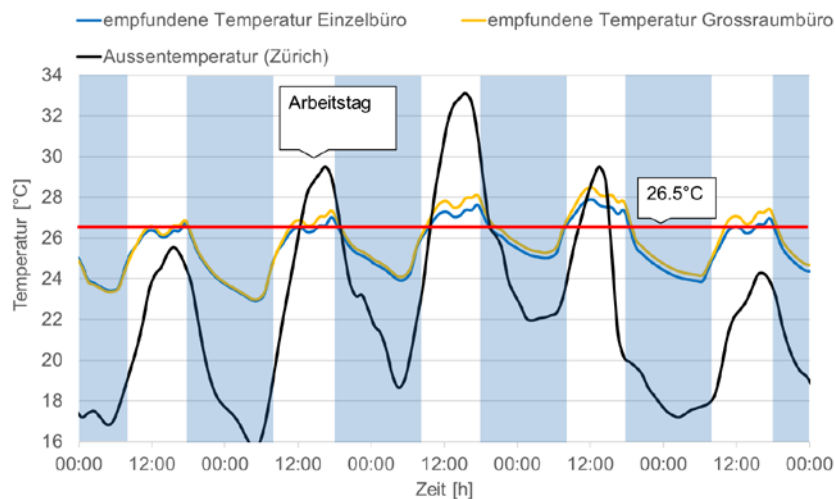


Abbildung 13 Temperaturverläufe vom 25.-29. Juli (wärmste Woche) für die Variante #10 (Betrieb Kühlung 9⁰⁰-17⁰⁰ Uhr, Vorlauf 18 °C, Schaltpunkt Kühlung 26 °C, Nachtlüftung 1.5 1/h, Nutzungszeit 8⁰⁰-18⁰⁰ Uhr).

Insgesamt zeigen die Simulationen, dass im Sommer die Flexibilität nicht ganz so hoch wie erwartet ist. Es sind tagsüber lange Laufzeiten der Wärmepumpe inklusive Wochenende und eine Nachtlüftung erforderlich, um ein angenehmes sommerliches Raumklima zu gewährleisten. Die hohen internen Lasten verhindern kürzere Laufzeiten für die Wärmepumpe.

5. Diskussion

5.1 Mehrfamilienhaus

Gute gedämmte Gebäude in Massivbauweise können auch im Hochwinter mit einem Tagbetrieb der Wärmepumpe von 8⁰⁰-17⁰⁰ Uhr den Komfort einhalten (> 20 °C).

In dem realen Gebäude ist die Wärmepumpe gegenüber der Auslegung (7 kW) um 27 % überdimensioniert. Aus den Messwerten wird eine effektiv benötigte Leistung von 5.3 kW bestimmt [5]. Damit entspricht die Überdimensionierung von Auslegung zu notwendig 32%, was durchaus üblich ist [15]. Die reale Wärmepumpe ist mit 8.9 kW deutlich überdimensioniert (real zu notwendig 68%). Diese Überdimensionierung ermöglicht jedoch den, auf die Tagesstunden limitierten Betrieb.

Es wird ein Diagramm entwickelt, aus dem die Wärmepumpenlaufzeit in Abhängigkeit von dem Heizwärmebedarf und der Wärmespeicherefähigkeit abgeleitet werden kann. Je kürzer die

notwendige Wärmepumpenlaufzeit ist, desto mehr Flexibilität kann das Gebäude dem Netz anbieten bzw. kann der Eigenverbrauch erhöht werden, indem die Wärmepumpe nur zu Tageszeiten läuft. Wird die Wärmepumpe im Taktbetrieb betrieben, reduzieren sich die notwendigen Laufzeiten um ein bis zwei Stunden. Es wird davon ausgegangen, dass beim Taktbetrieb die Auskühlung weniger stark ist.

Die dargestellten Ergebnisse gelten jedoch nur für Gebäude mit einem ähnlichen Fensteranteil. Erste Tests mit einem hochverglasten Gebäude zeigen, dass die Ergebnisse nicht einfach übertragen werden können. Weitere Untersuchungen sind hier notwendig.

5.2 Büro

Der thermische Komfort im Winter ($> 20\text{ °C}$) kann nur eingehalten werden, wenn die Wärmepumpe zwischen 8⁰⁰-17⁰⁰ Uhr – auch am Wochenende – zum Heizen betrieben wird. Dies entspricht im Hochwinter in etwa den Stunden mit Tageslicht, d.h. Stunden mit Solarertrag, so dass ein hoher Eigenverbrauch erzielt werden kann.

Im Sommer muss die Wärmepumpe zwischen 6⁰⁰-20⁰⁰ Uhr – auch am Wochenende – zum Kühlen betrieben werden und zusätzlich eine Nachtlüftung mit einem Luftwechsel von 1.5 h^{-1} vorhanden sein, um den thermischen Komfort von $< 26\text{ °C}$ einzuhalten. Im Hochsommer entspricht der Betrieb von 6⁰⁰-20⁰⁰ Uhr einem Zeitfenster mit Solarangebot, so dass trotz langer Betriebszeit ein grosses Potential an Eigenverbrauch zur Verfügung steht.

Interne Lasten

Im Winter als auch im Sommer spielen die internen Lasten eine grosse Rolle. Der Effekt der internen Lasten ist jedoch gegensätzlich. Im Winter werden, um den Komfort sicherzustellen, hohe interne Lasten benötigt, während im Sommer diese so klein wie möglich sein sollten.

Mit den nach Norm geforderten 11 Stunden Beleuchtung ist ein Tagbetrieb der Wärmepumpe zum Kühlen nicht ausreichend. Aus diesem Grund wird die Reduktion der Wärmelast durch die Beleuchtung betrachtet, die Ergebnisse sind erwartungsgemäss positiv. In der Realität kann zum Beispiel der Einsatz von LED-Leuchtmitteln den Wärmeeintrag reduzieren helfen.

Solare Wärmegewinne

Im Zusammengang mit den sommerlichen Temperaturen muss die Verschattung betrachtet werden. In der Simulation ist für die Fenster eine Verglasung mit einem g-Wert von 50 % angenommen und eine aussenliegende Lamellenstore vorhanden. Die Lamellen stehen im heruntergelassenen Zustand horizontal. Dies wird als Kompromiss zwischen Tageslichtnutzung und Verschattung angenommen. Werden die Lamellen weiter geschlossen, muss mehr Kunstlicht verwendet werden. Die Annahme, dass die Beleuchtung während eines Sommertages aus ist, ist daher eventuell etwas zu optimistisch. Die Einhaltung des thermischen Komforts im Sommer kann daher die Flexibilität stärker begrenzen, als hier beschrieben ist.

Eine Möglichkeit wäre es, zusätzlich den g-Wert des Fensters zu reduzieren, wie dies bei vielen Bürobauten üblich ist. Dies würde den Solareintrag reduzieren, was sich im Sommer positiv auf die Reduktion des Kühlbedarfs auswirken würde. Im Winter erhöht der fehlende Solarertrag den Heizwärmebedarf. Um dies auszugleichen, muss dann die Laufzeit der Wärmepumpe verlängert werden. In der Simulation wird der Sonnenschutz auch im Winter als Blendschutz bedient. Vorzuziehen ist ein aussenliegender Sonnenschutz für den Sommerfall und ein innenliegender Blendschutz für den Winterfall. Da der innenliegende Blendschutz oft aus Kostengründen nicht realisiert wird, ist diese Variante hier nicht berücksichtigt. Weitere Untersuchungen sind jedoch vorgesehen.

Fazit

Insgesamt zeigen die Simulationen, dass in dieser Beispielbüroetage die Wärmepumpenlaufzeit auf den Tag limitiert werden kann. Auf Grund der hohen internen Lasten ist dies im Winter einfacher umzusetzen als im Sommer. Ähnliche Ergebnisse sind auch z.B. in [16] und [17] zu finden.

6. Zusammenfassung

Die aktive Nutzung der thermischen Gebäudemasse wird in Zukunft immer wichtiger, um durch den vermehrten Einsatz elektrisch betriebener Wärmepumpen den Eigenverbrauch erhöhen zu können. Es wird am Beispiel eines Mehrfamilienhauses und eines Bürogebäudes untersucht, ob der Betrieb der Wärmepumpe in den Tagesstunden ausreicht, um den thermischen Komfort sicherzustellen. Während beim Mehrfamilienhaus nur die Heizperiode betrachtet wird, wird beim Bürogebäude auch die Kühlperiode untersucht.

Aus dem untersuchten Mehrfamilienhaus können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Der Heizwärmebedarf hat den grössten Einfluss auf die notwendige Laufzeit der Wärmepumpe.
- Eine Wärmespeicherfähigkeit grösser ca. $60 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \text{K})$ bringt keine nennenswerte weitere Reduktion der Wärmepumpenlaufzeit.
- Bei Gebäuden mit einem hohen Heizwärmebedarf und niedriger Wärmespeicherfähigkeit reicht (bei dem betrachteten Wärmeabgabekonzept) auch eine grosse spezifische Wärmepumpenleistung nicht mehr aus, um in den für Heizzwecke verfügbaren 23 Stunden pro Tag die geforderten Temperaturen zu erreichen.

Für das Bürogebäude kann im Winter ein Tagbetrieb für die Wärmepumpe für Heizzwecke zwischen 8⁰⁰-17⁰⁰ Uhr realisiert werden. Dies entspricht der kürzesten Tageslänge im Winter. Die Simulationen zeigen jedoch, dass die internen Lasten im Winter einen wichtigen Beitrag zum thermischen Komfort leisten. Werden sie, z.B. durch eine reduzierte elektrische Beleuchtung, effizientere oder weniger Geräte oder eine geringere Belegung vermindert, so kann dies zu längeren notwendigen Laufzeiten der Wärmepumpe führen. In den untersuchten Varianten ist gegenüber SIA 2024:2015 der Wärmeeintrag durch die Beleuchtung über Mittag etwas reduziert.

Im Sommer sind lange Laufzeiten der Wärmepumpe zu Kühlzwecken (6⁰⁰-20⁰⁰ Uhr) und eine zusätzliche Nachtlüftung erforderlich, um einen guten thermischen Komfort zu gewährleisten. Im Hochsommer entspricht die Laufzeit von 6⁰⁰-20⁰⁰ Uhr der Zeit mit solarem Angebot, so dass trotz der langen Laufzeit eine hohe Gleichzeitigkeit mit dem Stromertrag erzielt wird. Eine grundsätzliche Reduktion der internen Lasten ist im Sommer wünschenswert, um kürzere Laufzeiten der Kühlung zu ermöglichen. Gegenüber SIA 2024:2015 wird bei den untersuchten Varianten kein Bedarf für die Beleuchtung zwischen 11⁰⁰-14⁰⁰ Uhr angenommen. Mit dem Profil gemäss SIA 2024:2015 ist der ausschliessliche Tagbetrieb der Kühlung nicht möglich; dabei ist anzumerken, dass der Betrieb der Beleuchtung in SIA 2024:2015 mit 11 Stunden zu 100 % im Sommer sehr hoch angesetzt ist.

Die Resultate für das Bürogebäude zeigen, dass

- sowohl im Sommer als auch im Winter muss der Anlagenbetrieb das Wochenende miteinschliessen.
- internen Lasten einen grossen Einfluss auf die nutzbare Flexibilität haben, die durch die thermische Masse zur Verfügung gestellt wird.
- interne Lasten im Winter und Sommer gegensätzlich Auswirkungen auf die verfügbare Flexibilität haben. Im Winter verkürzen hohe interne Lasten die tägliche Heizdauer und im Sommer verlängern sie die tägliche Kühldauer.

Grundsätzlich kann mit der Wärme- und Kälteverteilung über BKT sowohl im Winter als auch im Sommer Flexibilität in Hinblick auf die Gleichzeitigkeit mit einem möglichen Stromertrag bereitgestellt werden. Das untersuchte Bürogebäude bietet jedoch im Winter mehr Flexibilität als im Sommer.

Beide untersuchten Gebäudetypen zeigen, dass die thermische Gebäudemasse ein wichtiger Bestandteil im Rahmen der energetischen Flexibilität ist. Es lässt sich ableiten, dass die Flexibilität im Wohnbereich besser als im Bürobau zu nutzen ist, da im Bürobau die internen Lasten eine sehr grosse Rolle spielen.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Projekts "Energetische Flexibilität von Gebäuden" erarbeitet, welches das Bundesamt für Energie BFE (Schweiz) unter dem Kennzeichen SI/501240-01 fördert.

7. Literatur

- [1] "ESRU, ESP-r (open source): A Building and Plant Energy Simulation Environment. University of Strathclyde, Glasgow; <http://www.esru.strath.ac.uk>. Programm Version 2013."
- [2] "Sonnenaufgang und Sonnenuntergang." [Online]. Available: <http://www.sunrise-and-sunset.com>. [Accessed: 29-May-2018].
- [3] *Programm Meteonorm Version 6.1*. Meteotest, Bern.
- [4] M. Hall, F. Dorusch, and A. Geissler, "Optimierung des Eigenverbrauchs, der Eigendeckungsrate und der Netzbelastung von einem Mehrfamiliengebäude mit Elektromobilität," *Bauphysik*, vol. 36, no. 3, pp. 117–129, Jun. 2014.
- [5] M. Hall and A. Geissler, "Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf die energetische Flexibilität von Gebäuden," *Bauphysik*, vol. 37, no. 2, pp. 115–123, 2015.
- [6] *VDI 3807-2013: Energieverbrauchskennwerte für Gebäude - Grundlagen, Blatt 1*. Deutschland, 2013.
- [7] *ÖNORM B 8110-3, Wärmeschutz im Hochbau - Teil 3: Vermeidung sommerlicher Überwärmung*. 2012.
- [8] J. Knissel, "Energieeffiziente Büro- und Verwaltungsgebäude - Hinweise zur primärenergetischen und wirtschaftlichen Optimierung," Darmstadt, 1999.
- [9] SN EN ISO 13786:2007, *Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen. Dynamisch - thermische Kenngrößen - Berechnungsverfahren (ISO 13786:2007)*. 2007.
- [10] SIA 2028, *Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik*. Schweiz, 2010.
- [11] Merkblatt SIA 2024, "Standardnutzungsbedingungen für Energie – und Gebäudetechnik." 2006.
- [12] Merkblatt SIA 2024, "Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik." 2015.
- [13] SIA 380/1, "Heizwärmebedarf." 2016.
- [14] K. Voss, S. Herkel, D. Kalz, T. Lütendorf, A. Maas, and A. Wagner, *Performance von Gebäuden*. Fraunhofer IRB Verlag, 2016.
- [15] W. Schmid, "Je einfacher die Anlage, desto höher die Arbeitszahl," *SBZ*, vol. 10, pp. 50–53, 2010.
- [16] K. Klein, S. Herkel, H.-M. Henning, and C. Felsmann, "Load shifting using the heating and cooling system of an office building: Quantitative potential evaluation for different flexibility and storage options," *Appl. Energy*, vol. 203, pp. 917–937, 2017.
- [17] A. Kathirgamanathan, M. DeRosa, W. Turner, and D. Finn, "A Study on the Aggregation of Energy Flexibility of Commercial Buildings (unpublished technical report from IEA EBC Annex 67)," University College Dublin, Dublin, 2017.