

Sommerlicher Wärmeschutz im Holzbau: Weniger Masse und doch Klasse

Thermal insulation for summer – real class with less mass

Protezione termica estiva – buona qualità con meno massa

Protection solaire estivale – moins de masse et pourtant la classe

Robert Borsch-Laaks
Büro für Bauphysik
Aachen, Deutschland



Sommerlicher Wärmeschutz im Holzbau: Weniger Masse und doch Klasse

1. Der nächste Sommer kommt bestimmt

Es ist nicht mehr zu leugnen: Der Klimawandel wird zu heißeren Sommern führen, zumindest, wenn man die Zeiträume in Betracht zieht, die von einem heute errichteten Neubau als Lebensdauer erwartet wird. Die rd. 2 °C globale Erwärmung, die It. UN-Klimakonferenz 2007 bis zum Ende dieses Jahrhunderts prognostiziert sind, entsprechen in etwa einem Wechsel in die nächst wärmere Klimazone nach DIN 4108 Teil 2.

Es gibt viele Einflussfaktoren, die bestimmen, ob das Sommerklima in unseren Häusern behaglich ist oder nicht. Zu den planerisch beeinflussbaren Stellschrauben für das Sommerklima im Haus gehören:

- Der Wärmeschutz der Gebäudehülle.
- Größe, Orientierung und ggfs. Verschattung der Verglasungen.
- Die Lüftungsmöglichkeiten des Gebäudes und deren Anwendung durch die Nutzer.
- Die Speichermasse im Inneren des Gebäudes.

Um den Einfluss systematisch zu untersuchen, den die verschiedenen Stellschrauben auf die Erfüllung der Behaglichkeitskriterien haben, wählen wir ein Fallbeispiel, das geplant und gebaut wurde an einem sehr sommerwarmen Standort in der Rheinebene. Dieser Holzbau hat als zusätzliche Speichermasse einen Zementestrich auf allen Decken. Die Befensterung ist nach Architektenplanung, wie heute üblich, etwa doppelt so groß wie zur ausreichenden Raumbelichtung nach Bauordnung gefordert ist. Anhand dieses Fallbeispiels werden mit Hilfe der Sommerfallanalyse des Passivhaus- Projektierungspakets [PHPP 2007] die verschiedenen planerischen Handlungsalternativen betrachtet.

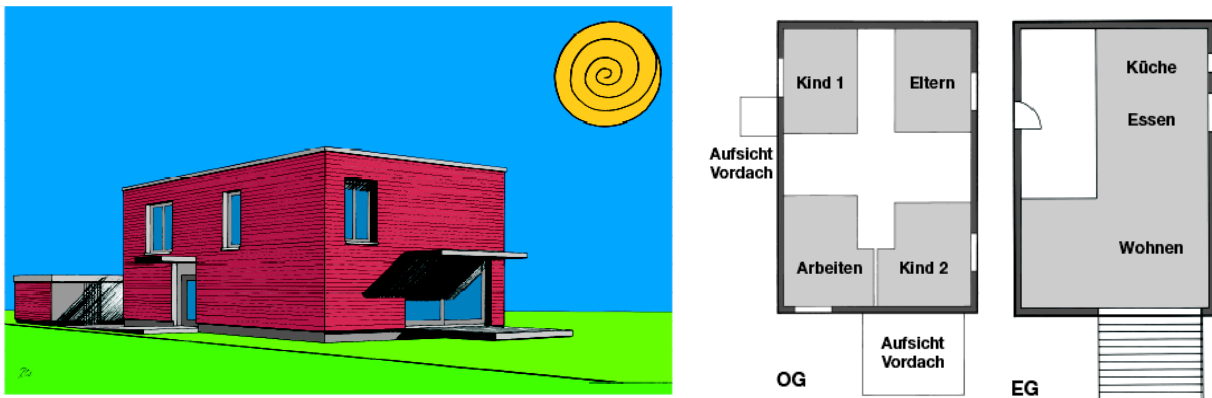


Abbildung 1: Unser Fallbeispiel: Ein zweigeschossiges EFH in Mannheim (Klimaregion C, sommerheiß).
 Flächenangaben: 137 m² Wohnfläche, 383 m² Gebäudehülle, 33 m² Fenster (13 m² Süd, 19 m² O/W, 1 m² Nord). Fensterfläche / Grundfläche für „kritische Räume“ (grau hinterlegt): 27 bis 33 %
 U- Werte (NEH / PH): 0,20 / 0,10 (Wand/ Dach), 0,30 / 0,18 (Boden), 1,56 / 0,83 (Fenster). g- Wert: 0,60 / 0,52. Raumvolumen: 342 m³.

2. Was heizt die Häuser auf?

Beginnen wir mit dem, was meist zuletzt bedacht wird. Die „**inneren Wärmequellen**“ insbesondere aus dem Stromverbrauch im Haushalt sind im Winter als (kleiner) Heizbeitrag willkommen. Im Sommer sind diese meist unerwünscht, aber dennoch immer vorhanden. Geht man aus von dem Kalkulationsansatz des Passivhausinstituts ($2,1 \text{ W/m}^2$), so hat ein normales Einfamilienhaus eine dauernde Wärmelast rund 300 Watt zu verkraften. Wählt man statt dieses „Stromsparhaushalts“ den Ansatz der EnEV, so können es auch 700 - 800 Watt werden. Der PC und die Unterhaltungselektronik im Kinderzimmer können im Dauerbetrieb und durch Standby- Verluste allein schon die Wärmelast in einem Zimmer um bis zu 200 W erhöhen.

Hinzu kommt das **Solarangebot** durch die transparenten Teile der Gebäudehülle. Im kritischsten Monat (Juli) erhält unser großzügig, aber nicht übermäßig befenstertes Beispielgebäude (Abb. 1) hieraus eine Dauerleistung von rund 1.000 Watt. Der Wärmedurchgang von außen durch die Aufheizung der nicht transparenten (opaken) Außenoberflächen sollte in der Sommerbilanz nicht vernachlässigt werden. Die neue Version des „PassivHaus Projektierungspakets“ [PHPP 2007] ermöglicht die explizite Ermittlung dieser Wärmequelle (vgl. Tab. 1).

Energiestandard	Solarapertur [m^2]		Mittl. Solarer Wärmeeintag [Watt]		
	transparente Flächen	opake Flächen	transparente Flächen	opake Flächen	Gesamt
NiedrigEnergieHaus (NEH)	7,6	1,5	1.016	261	1.277
PassivHaus (PH)	7,3	0,8	966	130	1.097

*) Berechnung für das Beispielgebäude am Standort Mannheim mit [PHPP 2007].
Hinweis: Die Solarapertur ist die effektive Öffnungsfläche unter Berücksichtigung aller Abminderungsfaktoren für die Solarstrahlung (Verschattung, Rahmenanteil, g-Wert etc.) beim Fenster. Bei opaken Flächen sind Strahlungsabsorption und -emission an der Außenoberfläche, Orientierung der Flächen und Umgebungsverschattung berücksichtigt.

Insbesondere die Flachdachfläche führt bei NEH- Dämmung ($U= 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$) zu einem nennenswerten Energieeintrag, wenn die Dachabdichtung aus dunklen Bahnen hergestellt wird (Absorption 90%). Der bessere Wärmeschutz des Passivhauses halbiert diesen Effekt. Insgesamt muss mit einem (unerwünschten) Aufheizeffekt von durchschnittlich 1.100 bis 1.300 Watt gerechnet werden. An sonnigen Tagen können es auch durchaus 30% mehr sein.

Zur **Entlastung der Sommerbilanz** trägt die Wärmeleitung (**Transmission**) bei, weil auch in sommerheißen Regionen die mittlere Außentemperatur im wärmsten Monat bei nur knapp 20°C liegt (vgl. Tab. 2). Fast die Hälfte der Wärmeabgabe durch Transmission erfolgt über die Fensterflächen (ohne Lüftung), obwohl sie an der gesamten Gebäudehülle nur einen Anteil von knapp 10 % haben. Ursache hierfür ist, dass ihr U-Wert auch bei effizienten Verglasungs- und Rahmensystemen stets etwa beim 6- bis 8- fachen der opaken Außenbauteile des jeweiligen Baustandards liegen. Ob die „**Kühlkomponente**“ der **Transmission mit 135 W/K (NEH) und 72 W/K (PH)** eine größere Bedeutung hat, hängt im Wesentlichen davon ab, wie groß die Temperaturdifferenz zwischen dem herrschenden Außenklima und dem noch als komfortabel empfundenen Raumklima ist.

Gleiches gilt für die natürliche **Gebäudekühlung durch Lüftung**. Bei einer Luftwechselrate von **1,0 1/h** kann je Grad Temperaturunterschied zwischen drinnen und draußen eine Wärmeleistung von 113 Watt abgeführt werden. Lässt man eine Übertemperatur des Gebäudes von 5°C im Tagesmittel zu, so ergibt sich insgesamt ein **Potential zur Wärmeabfuhr von 560 W**. Hieran kann man bereits erkennen, dass eine ausreichende Sommerlüftung eine der großen Stellschrauben für das Innenklima ist.

Es gehört zum bautechnischen Allgemeinwissen, dass sich Leichtbauten schneller aufheizen als massive Gebäude. Dies zeigt folgende einfache Vergleichsrechnung:

Die **spezifische Wärmekapazität** des Beispielgebäudes (Holzbau mit Massivestrich) beträgt 11,5 kWh/K. Wenn im Verlauf einer einwöchigen Hitzeperiode das Gebäude um 5 ° C aufgeheizt wird, wird eine Energiemenge von rd. 60 kWh eingespeichert. Dies entspricht einer mittleren „Kühlleistung“ durch die Speichermasse des Gebäudes von 340 W. Bei Massivbauweise (28 kWh/K) kann in der gleichen Zeit die 2½ fache Menge Überschussenergie „geschluckt“ werden („Kühlleistung“ 830 W).

Aber: Wärmespeicherung ist noch keine Wärmeabfuhr, sondern bewirkt allenfalls eine Verschiebung des Aufheizproblems. Ob angesichts unerwünschter Wärmeeinträge von ca. 2.000 W diese Verschiebung mehr oder weniger ausreichend ist, kann erst entschieden werden, wenn das Zusammenwirken aller Raumklimafaktoren betrachtet wird.

2.1. Wie warm darf es werden?

Bei der Definition ihrer Klimazonen geht die grundlegende technische Norm in Deutschland [DIN 4108-2: 2003] davon aus, dass ein bestimmter

- „Grenzwert der Innentemperatur an **nicht mehr als 10 % der Aufenthaltszeit** (bei Wohngebäuden üblicherweise 24 h/d; bei Büroräumen üblicherweise 10 h/d) in beheizten Gebäuden überschritten werden soll“. (vgl. Tabelle 2).

Interessant ist die Anmerkung zu dieser Tabelle: „Eine unterschiedliche Festlegung des Grenzwertes der Innentemperatur ist wegen der Adaption des Menschen an das vorherrschende Außenklima gewählt“.

Tabelle 2: Grenzwerte der Innentemperaturen für die Sommer-Klimaregionen nach [DIN 4108-2, Tab.6]

Sommer-Klimaregion	Merkmal der Region	Grenzwert der Innentemperatur	Höchstwert der mittl. monatl. Außentemperatur	Zum Beispiel:	
				Mittl. Temperatur im Juli	
A	sommerkühl	25 °C	≤ 16,5 °C	15,4 °C	Hof
B	gemäßigt	26 °C	> 16,5 bis < 18°C	17,2 °C	Hannover
C	sommerheiß	27 °C	≥ 18 °C	19,9 °C	Freiburg

Nach Norm müssen also die Hausbewohner in Klimazone C an 10 % der Jahresstunden Temperaturen mehr als 27 ° C in ihren Häusern aushalten, heißt 876 Std., heißt 35 (!) Tage.

Solch hohe und lange Übertemperatursituationen sind in einer mobilen Gesellschaft nicht mehr zeitgemäß. Wer heute die kühlen Mittelgebirgsregionen verlassen muss, um in den Metropolen des Rheintals zu arbeiten, hat keine Chance zur evolutionären Adaption. Deshalb werden wir uns im Folgenden bei der Entwicklung von richtigen Lüftungsstrategien an den Temperatur- Empfehlungen für Klimazone A und B orientieren, aber mit den Klimadaten des realen Standortes unseres Beispiels (Mannheim) kalkulieren.

2.2. Sommerfallanalyse mit dem PHPP

In der Neufassung der zitierten Norm steht unter 8.2:

„Der Nachweis ist bei Bedarf mit Hilfe genauerer, ingenieurmäßiger Berechnungsverfahren unter Beachtung der Randbedingungen (siehe 8.4) zu führen. Die Anwendung solcher Verfahren ist generell zulässig.“

Für die Untersuchung großer Objekte („mit viel Glas“) wird die dynamische Simulation des Sommerklimas heute vielfach angewendet. In Parameterstudien wurde von verschiedenen Autoren hiermit auch der Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit von Dämmstoffen untersucht (vgl. Literatur [6] bis [9] sowie [12] und [13]). Die Ergebnisse sind uneinheitlich und scheinen vor allem davon abzuhängen, wer Auftraggeber der Studie

war. Gemeinsam ist jedoch allen dynamischen Untersuchungen, dass an erster Stelle die Bedeutung der Solareinstrahlung ausgemacht wird. Im Planungsalltag für Wohngebäude ist der datentechnische Aufwand für solche Simulationsverfahren in der Regel viel zu hoch, um hierfür Auftraggeber zu finden.

Die üblichen Softwareangebote zur Energiebilanzierung nach EnEV können den Sommerfall nur entsprechend den eingeschränkten Möglichkeiten des Normverfahrens kalkulieren und das durch recht aufwändige Einzelraumbetrachtung. Ergebnis ist ein völlig unanschaulicher, fiktiver „Sonneneintragswert“, der mit einem normativ zulässigen Wert verglichen wird. Eine solche Bewertung wurde für das Fallbeispiel durchgeführt und in [Borsch-Laaks / Wagner 2004] veröffentlicht.

Aber es gibt auch einen „dritten Weg“ für die Planung:

Das **PassivHaus- ProjektierungsPaket (PHPP)** des Passivhaus-Instituts, Darmstadt [PHPP 2007], erlaubt eine Sommerfallanalyse, die wie die dynamischen Verfahren an der eigentlichen Zielgröße orientiert ist - der **Begrenzung der „Überhitzungsstunden“**.

Dabei wird vom PHI – auf der sicheren Seite liegend – empfohlen die **Grenztemperatur von 25°C** zum Maßstab (in allen Regionen!) für die Einplanung „*von zusätzlichen Maßnahmen zum Schutz vor Sommerhitze*“ zu machen. Informativ lassen sich auch die Stunden mit mehr als 26 °C ermitteln.

Wir definieren darüber hinaus für Wohngebäude:

- **Komfort- Raumklima: weniger als 5 % der Jahresstunden > 25°C.**

Natürlich kann man mit dem PHPP, wie beim Normverfahren, durch Änderung der **Fenstergröße** und den Faktoren für den **temporären Sonnenschutz** das Ergebnis beeinflussen. Zusätzlich wird berücksichtigt:

- Die genaue **Fensterorientierung** und die objektspezifische **Glasfläche**.
- **Verschattung** durch Topografie, Nachbargebäude, Leibungen, Versprünge in der Fassade etc.
- Die Wärmeeinträge durch **opake Flächen**.
- Die **Luftwechselrate** (durch Dauer- und Nachtlüftung).
- Die **inneren Wärmequellen**
- Der **Wärmeschutz** aller Außenbauteile.
- Die innere **Speichermasse** des Gebäudes.

Das PHPP ermöglicht – ohne Sonderaufwand – allerdings keine differenzierte **Analyse einzelner Räume**. Die Validierung des Verfahrens durch dynamische Berechnungen und Messungen an bewohnten Objekten hat allerdings den Nachweis erbracht, dass über die Temperaturen **des gesamten Gebäudes** bzw. der Wohneinheiten eine genügend genaue Abschätzung der Klimasituationen erfolgen kann [AKkPH 2001]. Je besser der Wärmeschutz der Gebäudehülle, desto geringer fallen die internen Temperaturunterschiede aus.

Vor diesem Hintergrund bietet das PHPP einen wesentlich einfacheren und zugleich flexibleren Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes als das Normverfahren: Statt penible Datenaufnahme der Einzelräume zu betreiben, kann mit dem „normalen“ Datensatz aus der Heizwärmebilanzierung weiter gerechnet werden. Es wird der Blick frei auf die eigentlichen klimatischen und physikalischen Einflussfaktoren und ihre Auswirkungen.

3. Basisfall: Einfluss des Sonnenschutzes

Für unser Mustergebäude wählen wir ein sommerheißes Klima (Standort: Mannheim) und die geplante Holzbauweise mit Zementestrich auf den Decken. Da das PHPP auch die Wechselwirkungen zum Wärmeschutz kalkuliert, unterscheiden wir zwischen **Niedrig-Energie-** und **PassivHaus- Standard** (vgl. Abb. 1) - bei sonst gleicher Geometrie, gleichen Fenstergrößen und -orientierungen. Die Basisversion geht – auf der ungünstigen Seite liegend - davon aus, dass die Luftwechselrate im Sommer auf dem gleichen Niveau liegt, wie in der Heizperiode.

Über eine Lüftungsanlage wird im Mittel ein 0,32-facher Luftwechsel pro Stunde (hygienisches Minimum bei 4 Personen) sichergestellt - im NEH über eine Abluftanlage, im PH durch eine Zu-/Abluftanlage mit Sommerbypass, also mit abgeschalteter Wärmerückgewinnung.

3.1. Ohne Verschattung: Geht nicht!

Die Berechnung für die Basisversion (**ohne temporäre Verschattungsmaßnahmen**) kommt zu dem Ergebnis, dass noch nicht einmal die 26°C- Grenze an weniger als 10% der Jahresstunden eingehalten wird (vgl. Tab. 3). Ohne Veränderungen an Größe und Orientierung der Fensterflächen ist mit sommerlicher Überhitzung zu rechnen. Im NEH wird die Grenze der Übertemperaturhäufigkeit um 70 % überschritten. Beim PassivHaus beträgt die Überhitzungszeit sogar etwa jede dritte Jahresstunde.

Mit innen liegenden Jalousien ($F_C = 0,75$) kommt das NEH in die Nähe der empfohlenen Grenze. Das Passivhaus ist bei den gleichen Maßnahmen noch weit vom Ziel entfernt. Jede 4. Stunde im Haus liegt noch über 26 °C.

Nur durch einen außen liegenden Sonnenschutz mit einem hohen Verschattungsfaktor ($F_C \leq 60\%$ beim NEH bzw. $\leq 20\%$ beim PH) wäre das Ziel maximal 10% über 25°C zu erreichen. Damit gäbe es für beide Haustypen eine technische Lösung, aber auch einen neuen, heftigen Kostenfaktor.

Haustyp		NiedrigEnergieHaus		PassivHaus	
Übertemperaturgrenze		25°C	26°C	25°C	26°C
1	Basisversion (ohne Verschattung)	17%	12%	35%	31%
2	innenliegende Jalousien o.ä. ($F_C = 0,75$)	12%	9%	29%	25%
3	außenliegende Verschattung, Markise o.ä. ($F_C = 0,50$)	9%	7%	19%	13%

Hinweis: der Verschattungsfaktor F_C ist n. DIN 4108-2 so definiert: $F_C = 1$ keine Verschattung, $F_C = 0$ vollständige Verschattung

Vordach oder Markise beim Wohnzimmerfenster?

Der Einfluss der Überdachung des großen Süd- orientierten Wohnzimmerfensters (10 m²) kann nach dem Normverfahren nicht berücksichtigt werden, da der Abdeckwinkel auch bei 1,50m Auskrägung zu gering ist, vgl. [Borsch-Laaks/ Wagner 2004]. PHPP erfasst die Passiv- Solar- Bilanz beim Fenster im Winter und im Sommer genauer.

Im Sommer beträgt der Verschattungseffekt des Vordaches immerhin ca. 50 %. Der Einfluss auf die Überhitzungsstunden ist merklich. Ohne Vordach steigt die Zahl der Temperaturen über 25°C um 2,3 %-Punkte (NEH) bis 3,7 %-Punkte (PH). Ersetzt man das Vordach durch eine ausfahrbare Markise ($F_C = 0,50$), so bringt dies kalkulatorisch etwa den gleichen sommerlichen Verschattungseffekt – ohne den Verlust an passiven Solargewinnen in der Heizperiode, die immerhin 25% betragen.

3.2. Warum reagiert das PassivHaus empfindlicher?

Der Vergleich bestätigt die landläufige Meinung, dass ein PassivHaus bei einer ungünstigen Ausrichtung und Größe der Fensterflächen deutlich empfindlicher auf ein Überangebot an passiven Wärmequellen reagiert.

Ursache ist hierfür vor allem die Transmissionskühllast, die im Vergleich zum NEH nur etwa halb so groß ist (vgl. Kapitel 2.1). Trotz der geringeren opaken Wärmelasten muss ein größerer Anteil der vor allem über die Fenster eingestrahelten Wärmegewinne durch vermehrte Lüftung ausgeglichen werden. Wollte man dies durch die im PassivHaus sowieso vorhandene Lüftungsanlage erreichen, sind dem jedoch enge Grenzen gesetzt. Ein simple Erhöhung des Luftvolumenstroms im Rahmen dessen, was eine auf Hygienelüftung optimierte Lüftungsanlage fördern kann, erbringt nicht die erforderlichen Kühlleistungen (s. Kap. 4).

4. Natürliche Kühlung: Die richtige Sommerlüftung

4.1. Das Kühlpotential

Auch in der Klimazone C (sommerheiß) erreichen an den „Hundstagen“ mit Höchstwerten um 30 °C die Tagesmitteltemperaturen nur Werte von 25° C und darunter (vgl. Abb. 2 links). In anderen Regionen liegen die Mittelwerte um jeweils 2°C niedriger. Damit bleiben im gesamten Sommerhalbjahr die Außenlufttemperaturen die meiste Zeit unter dem Niveau, was als Innenklima erfahrungsgemäß zumutbar ist.

Selbst an Hitzetagen fallen in den heute schon wärmsten Regionen unseres Landes die Temperaturen in der Nacht meist unter 20 ° (vgl. Abb. 2 rechts). D. h. im Luftaustausch zwischen innen und außen steckt eine nennenswerte Wärmesenke, die zur Auskühlung ergänzend zur Transmission nutzbar gemacht werden kann.

Auch dann, wenn Fenster den ganzen Tag über in gleicher Öffnungsstellung belassen werden, kommt es netto zu einem Auskühlungseffekt. Seine Höhe folgt der Differenz zwischen der tagesmittleren Außenlufttemperatur und der herrschenden Raumlufttemperatur.

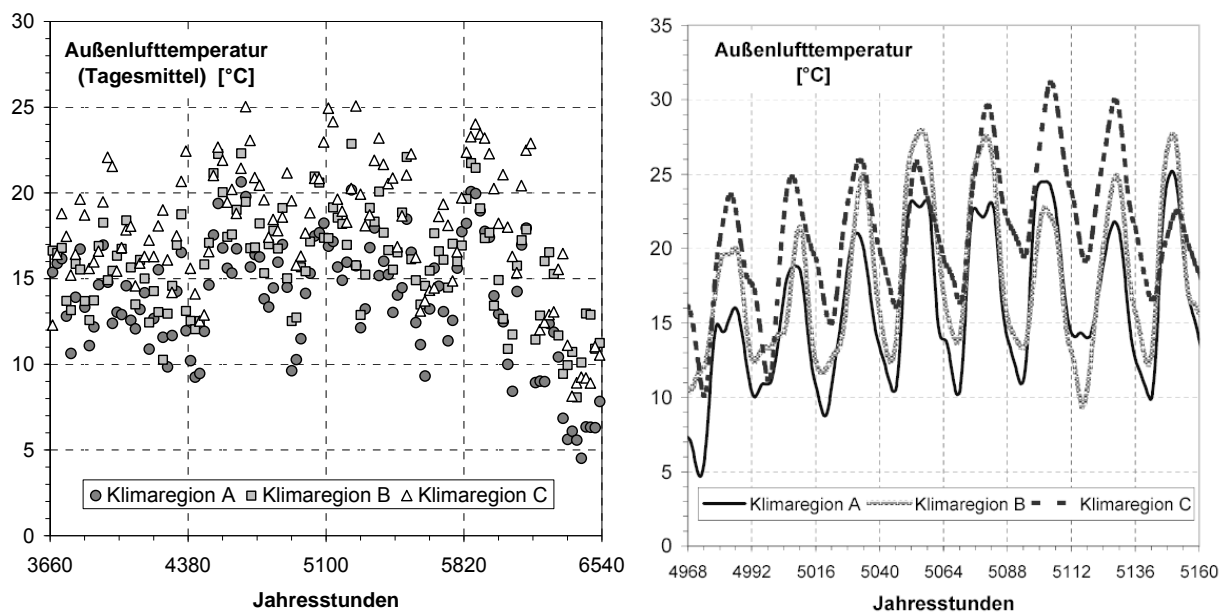


Abbildung 2 links: Tagesmitteltemperatur in den Sommermonaten (Juni –September) an drei repräsentativen Standorten aus verschiedenen Klimaregionen (A: Hof, B: Hannover, C: Freiburg).

rechts: Temperaturverläufe in einer 8-tägigen Hitzeperiode in den drei Klimaregionen.

4.2. Wie viel Luftwechsel ist im Sommer nötig?

Was der einfache statische Vergleich von Wärme- und Kühllasten (Kap. 2.1) schon andeutete, ist der Schlüssel zur Lösung des Überhitzungsproblems eine geschickte Lüftungsstrategie, die durch eine problembewusste Planung ermöglicht wird.

Zunächst haben wir untersucht, welche Luftwechselraten notwendig sind, wenn versucht wird **mit durchlaufender Lüftungsanlage und/oder zeitlich unveränderter Fensterlüftung** die Komfortbedingungen zu erreichen. Tab. 4 zeigt, dass die Minimalanforderung beim Gebäude ohne temporäre Verschattungsmaßnahmen eine durchschnittliche Luftwechselrate zwischen 0,7 (NEH) und 1,1 (PH) 1/h verlangen. Wird die Komfortgrenze angestrebt, so muss die Luftwechselrate sogar auf das zwei- bis dreifache erhöht werden. Werden die jeweils bodentiefen Fensterelemente mit einer fest montierten innen liegenden Verschattung ausgestattet (z. B. Jalousien oder Textilien mit hohem Reflektionsgrad), lassen sich die erforderlichen Luftwechselraten um ca. 30 % reduzieren.

Sonnenschutz	ohne Verschattung ($F_c = 1,00$)				Innen liegende Verschattung ($F_c = 0,75$)			
	Minimum: 10% > 25°C		Komfort: 5% > 25°C		Minimum: 10% > 25°C		Komfort: 5% > 25°C	
NiedrigEnergieHaus	0,7	1/h	2,1	1/h	0,5	1/h	1,5	1/h
PassivHaus	1,1	1/h	2,3	1/h	0,8	1/h	1,8	1/h

Für diese minimale, noch kostengünstige Verschattungsmaßnahme spricht ein weiterer Grund: Thermische Unbehaglichkeit stellt sich nicht alleine bei hohen Lufttemperaturen ein. Bei direkter Besonnung des Aufenthaltsbereichs fühlt sich der Mensch durch die direkte Bestrahlung auch bei sonst noch erträglichen Lufttemperaturen schon unwohl. Dies ist auch der Grund warum in vielen Gebäuden mit schlecht geplantem Sommerklima oft die Innenverschattung als Minimalmaßnahme nachgerüstet wird.

4.3. Lüften im Sommer: Wie viel und womit?

Seit der 2004-Version bietet das PHPP die Möglichkeit, die Sommerlüftung gesondert zu planen. Im Tabellenblatt „Sommluft“ sind Planungswerte für verschiedene **Arten der Fensterlüftung** hinterlegt. Es können die Kippstellung und die vollständige Öffnung von Fenstern, die Einzelraum- und die Querlüftung und die thermisch durch Auftrieb angeregte Lüftung für jede Fenstergeometrie ermittelt werden. Mit diesem Instrument haben wir im Folgenden verschiedene mögliche Lüftungsstrategien auf Ihre Wirksamkeit untersucht.

Vom Nutzer aus gesehen ist das oft verpönte Kippfenster sicher das akzeptabelste Lüftungsinstrument. Deshalb haben wir zunächst angenommen, dass je Zimmer ein Fensterflügel im Sommer dauerhaft auf „Kipp“ steht. Die Innentüren sind geschlossen, so dass die Luftströmung nur im betreffenden Raum zirkuliert.

An einem gekippten Flügel findet im Mittel ein Luftaustausch von 40 m³/h statt (siehe Abb. 3 links, oben). Auf das ganze Haus hochgerechnet ergibt sich bei 7 in Frage kommenden Fenstern ein mittlerer Luftwechsel von 0,82 1/h. Nimmt man Querlüftung durch offen stehende Innentüren hinzu, so wären auch 0,92 1/h im Schnitt möglich. Hiermit wird rechnerisch der Zielwert der erforderlichen Luftwechselrate gem. Tab. 4 beim NEH erreicht. Für das PH langt dies jedoch nicht.

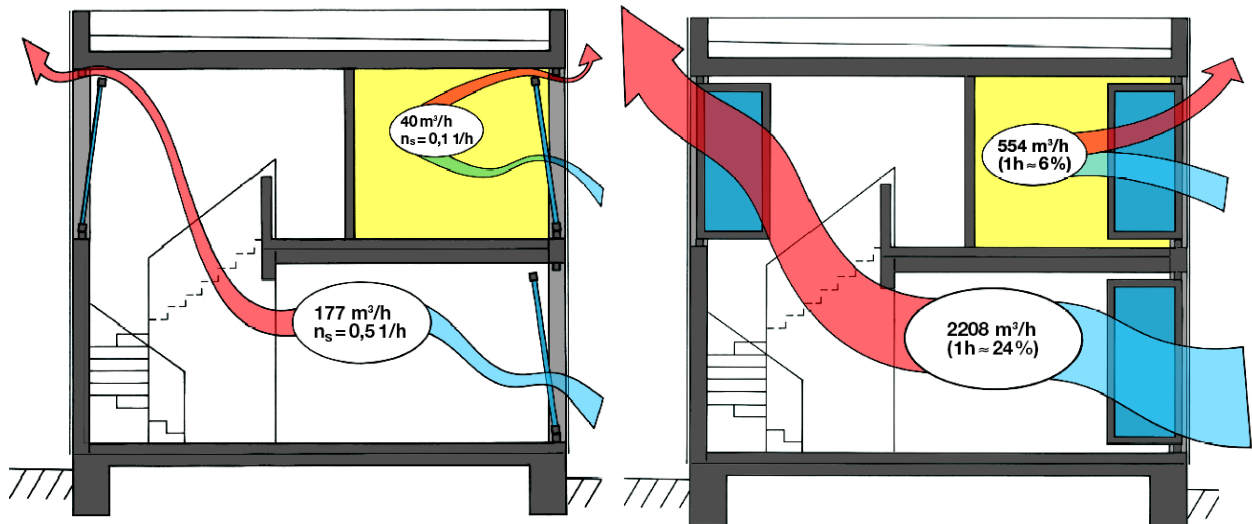


Abbildung 3 links: Hausschnitt mit verschiedenen Lüftungskonzepten bei Kippstellung der Fenster
 Randbedingungen: raumhohe Fenster, liches Maß je Flügel: $0,60 \times 2,27 \text{ m}^2$, Kippweite 50 mm, mittl. Temperaturdifferenz: $4 \text{ }^\circ\text{C}$, Windgeschwindigkeit: 1 m/s , Raumvolumen: 342 m^3 .

Rechts: Strömungspfade und Luftvolumenströme bei verschiedenen einstündigen Stoßlüftungen (Öffnungsflächen und Klimabedingungen wie links³). Werte in Klammern: Beitrag der Stoßlüftung zum erforderlichen Gesamtluftwechsel für weniger als 10% über 25° im PH.

Kann die Kipplüftung ausreichen?

Bei der Wertung dieser Ergebnisse sollte bedacht werden, dass diese nur hinreichen, wenn diese Lüftungsstrategie konsequent durchgehalten wird, d.h. auch in kühleren Perioden **alle** Fenster „auf Kipp“ bleiben, damit das Gebäude mit möglichst geringer (aber noch komfortabler) Temperatur in die nächste Aufheizphase einsteigt. Am ehesten ist diese Lüftungsstrategie mit 5 kippbaren Fenstertüren im OG Erfolg versprechend. Im EG können nur zwei vorhandene Kippfenster kaum für eine akzeptable Luftdurchströmung sorgen.

Außerdem ist unbedingt darauf zu achten, dass die berechneten Öffnungsquerschnitte am gekippten Fenster tatsächlich zu Verfügung stehen. Wenn der Abstand zwischen Flügel und oberer Leibung enger ist als die von uns kalkulierte Kippweite von 50 mm, dann kann sich der tatsächliche Luftaustausch bis auf die Hälfte reduzieren.

Die Thermik: der stärkste Lüftungs“motor“

Einen wesentlich größeren Luftaustausch kann man erzielen, wenn der thermische Auftrieb zwischen den Geschossen genutzt wird. Bei unserem Mustergebäude ist dies relativ einfach zu bewerkstelligen, da der Treppenaufgang zum Obergeschoss zum Wohnraum hin offen ist (Abb. 3). Es ist deshalb folgende **Strategie zur Dauerlüftung** in Hitzeperioden denkbar:

Zwei Fenster in Küche/ Essen im EG und je ein Fenster im Treppenbereich und im Bad des OG auf Kipp gestellt. Dies führt zu $355 \text{ m}^3/\text{h}$ Dauerlüftung ($n_s = 1,04 \text{ 1/h}$). Hiermit könnten auch die Anforderungen für die PH- Lüftung rechnerisch nahezu erreicht werden – sofern Einbruch- und Gewitterschutz dem nicht entgegenstehen.

Stoßlüftung im Sommer

Wird ein Fensterflügel ganz geöffnet, steigt der Luftaustausch auf mehr als das 10-fache gegenüber der Kippstellung (Abb. 3 rechts, oben). Diese Erkenntnis hilft in der Praxis jedoch nur begrenzt, denn diese effiziente Lüftung kann nur zeitweise durchgeführt werden (Einstiegsgefahr, Windböen). Deshalb haben wir in Abb. 3 an zwei Beispielen dargestellt, welchen Beitrag **Stoßlüftungen von einstündiger Dauer** für die mittlere Luftwechselrate erbringen können, wenn diese zu einem Zeitpunkt durchgeführt werden, wenn die Außentemperatur noch unter dem Tagesmittel liegt.

Das stundenweise Lüften mit einzelnen offenen Fenstern liefert zur erforderlichen Kühlung nur einen geringen Beitrag (auch bei Querlüftung). Wird zum rechten Zeitpunkt die Thermik über zwei Geschosse genutzt, dann können zwei offene Fenster binnen einer Stunde immerhin ein Viertel des täglichen Bedarfs an natürlich kühlender Lüftung decken (Abb. 3 rechts, unten).

4.4. Besser lüften in der Nacht

Ein Blick auf die Temperaturkurven in einer Hitzeperiode zeigt (Abb. 2 rechts), dass in allen Klimaregionen die Außentemperaturen während der kühleren Hälfte des Tages meist deutlich unter 20 ° C sinken. Der Effekt der gezielten **Nachtlüftung zur Entladung des aufgeheizten Wärmespeichers „Haus“** kann mit der neuen Version des Passivhaus-Projektierungspakets [PHPP 2007] gesondert analysiert werden.

Wir haben für **das unverschattete PassivHaus**, das wie zuvor betrachtet den größten Lüftungsaufwand erfordert, die Chancen der gezielten Nachtlüftung untersucht. Es wird davon ausgegangen, dass über die sowieso vorhandene Lüftungsanlage eine Dauerlüftung entsprechend dem hygienischen Bedarf auch in der Sommerzeit erfolgt ($n = 0,32$ 1/h). Hierauf wird zusätzliche Nachtlüftung aufgesattelt. Ob diese ebenfalls von der Lüftungsanlage geliefert wird, oder über das Öffnen von Fenstern erfolgt, ist zunächst unerheblich.

Abb. 4 zeigt, dass die Unterschreitung der Grenztemperaturen schon mit vergleichsweise geringen Luftwechselraten auch am sommerheißen Standort Mannheim erreicht werden können. Für das **Erdgeschoss** des Beispielgebäudes reicht ein Nachtluftwechsel von weniger als 0,1 1/h, um die 10 %-Marke auch bei einer Übertemperaturgrenze von 25 ° C zu unterschreiten. Bei diesem Luftwechsel wird allerdings die 26 ° C-Grenze auch noch in 7 % der Jahresstunden überschritten (immerhin 25 Tage). Um keine Raumtemperaturen über 26 ° C zuzulassen, müsste die Nachtlüftung allerdings auf 0,6 1/h gesteigert werden. Das Komfortkriterium (max. 5% über 25 ° C) lässt sich mit 0,25 1/h bewerkstelligen.

Im **Obergeschoss**, das nur unverschattete und relativ große Fensterflächen aufweist und außerdem die Einstrahlung auf das schwarze Dach zu verkraften hat (50 % höhere Solarapertur als im EG), liegen die notwendigen Nachtluftwechsel deutlich höher. Ein Luftaustausch, der im EG schon hohen Komfort gewährleistet, reicht im OG gerade mal zu Einhaltung der Mindestanforderung. Um zumindest die 26 ° C- Grenze an nicht mehr als 5% der Jahresstunden zu überschreiten ist schon $n \geq 0,45$ 1/h während der kühleren Tageszeit erforderlich. Für das Komfortklima werden sogar 0,7 1/h benötigt.

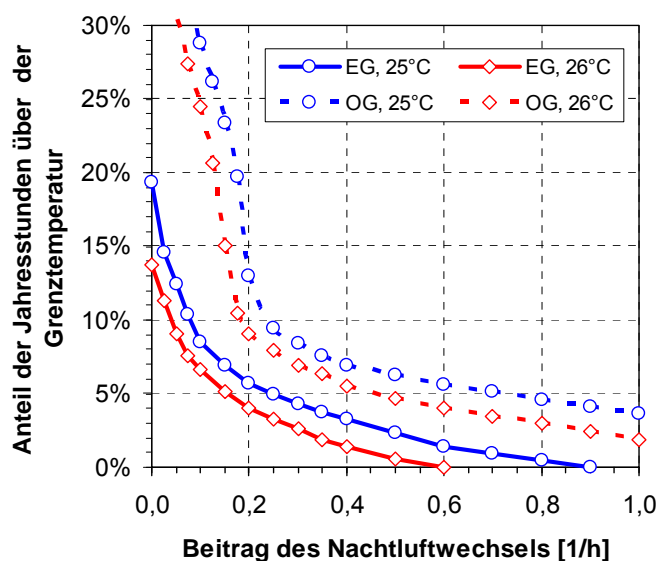


Abbildung 4: Erforderliche Nachtlüftungsrate für die Absenkung der Übertemperaturstunden. Randbedingungen: Passivhaus Standard, Holzrahmenbau mit Massivestrich, keine temporäre Verschattung. Solarapertur EG: 3,1 m², OG: 4,5 m²

4.5. Techniken und Planung der Nachtlüftung

Tabelle 4 gibt Auskunft darüber, welche Nachtlüftungskonstellationen mit den vorhandenen offenbaren Fenstern im Rahmen der vom Entwurf vorgegebenen Möglichkeiten umsetzbar sind.

Im Obergeschoss sind 4 Fenstertüren vorhanden, die **bei nächtlicher Kippstellung** jeweils einen Luftaustausch von 20 m³/h ermöglichen (Abb. 5 rechts, oben). Hiermit kann eine Nachtluftwechselrate um $n = 0,30$ 1/h für die relativ kleinen Zimmer bewerkstelligt werden.

Dies reicht für das Minimalziel (weniger als 10 % oberhalb 25 °C). Das Bad- und das Flurfenster kann in dieses Konzept allerdings nicht einbezogen werden. Zusätzliche Öffnungen in Abluft- oder Überstromzone setzen die Querlüftungsfunktion einer Lüftungsanlage außer Kraft.

Tabelle 4: Nachtluftwechselrate in Abhängigkeit von Art und Größe der Fensteröffnung. Einheit der Zahlenwerte [1/h]

	Dauer	Anzahl der Fenster			Anforderung
Obergeschoss	[h/d]	1	3	5	Minimum
Fenstertür gekippt	12	0,05	0,16	0,27	0,25
Fenstertür offen	1	0,06	0,19	0,31	Komfort
Fenstertür offen	2	0,12	0,37	0,62	0,72
Erdgeschoss	[h/d]	1	2	2 kl. Nordf.	Minimum
Fenstertür gekippt	4	0,02	0,04	0,00	0,08
Fenstertür offen	1	0,06	0,13	0,01	Komfort
Schiebetür, halb/ganz geöffnet	1	0,10	0,19	-	0,25

Durch **ganz geöffnete Fensterflügel** erfolgt auch nachts ein mehr als zehnfacher Luftaustausch, so dass theoretisch schon eine einzige während der ganzen Nachtzeit geöffnete Fenstertür eine Luftwechselrate von 0,8 1/h erzeugen könnte. Dies erfordert allerdings geöffnete Innentüren, damit Querströmungen auch die anderen Räume erfassen können. Ganz geöffnete Fenster können überdies zu einer so schnellen Abkühlung führen, dass die kalkulatorische Minimaltemperatur (22°C) in den Nachtstunden unterschritten wird. Wollten die Bewohner hierauf plangemäß reagieren, dann müssten sie sich ggf. durch einen Temperatursensor wecken lassen. Eine realistischere Lüftungsstrategie wäre, in den OG- Räumen abends spät und/oder morgens früh ein bis zwei Stunden eine Stoßlüftung vorzunehmen.

Tabelle 4 zeigt, dass im Prinzip durch eine geeignete Auswahl von Dauer und Anzahl der vollständigen Öffnungen alle Anforderungen an die Nachtlüftungsraten zu erfüllen sind. Die Frage ist allerdings, ob soviel Lüftungskenntnisse und vor allem Lüftungsdisziplin von den Bewohnern zu erwarten ist.

Wie geht Nachtlüftung im Erdgeschoß?

Obwohl die solaren Lasten und dementsprechend die erforderlichen Luftwechselraten deutlich niedriger sind, ist die Nachtkühlung im Erdgeschoss schwieriger. Zur Schlafenszeit oder auch während des abendlichen Besuchs im Biergarten wird wohl niemand Fenster oder gar Türen offen stehen lassen. Selbst die Kippstellung kann bei Abwesenheit den **Versicherungsschutz** gefährden. Sofern keine Lüftungsanlage vorhanden ist, wird es an Werktagen für viele Familien schwierig überhaupt den Grundluftwechsel zu bewerkstelligen.

Im Erdgeschoss sind nur zwei kippbare Fenstertüren vorhanden, dementsprechend gering ist der mögliche Luftaustausch. Die kleinen Nordfenster (0,2 m² Öffnung) tragen selbst voll geöffnet kaum hierzu bei. Die theoretisch größte Lüftungsöffnung im EG (Schiebetür vor der Terrasse) lässt sich nur **stoßweise in den Abend- und Morgenstunden** nutzen. Da diese gleichzeitig Durchgangsbereich zwischen Wohnraum und Garten ist, steht die nächste Zusatzeinrichtung auf der Tagesordnung: eine Insektenschutztür. Kaltluftströmungen durch große Öffnungen werden überdies im Aufenthaltsbereich schnell als unangenehm empfunden - zumal, wenn die Bewohner sommerlich bekleidet und ruhend auf dem Sofa sitzen.

Alle Nachtkühlungspotentiale, die für das EG in Tab. 4 aufgeführt sind, stehen also unter (großem) Vorbehalt der sonstigen Schutzbedürfnisse der Bewohner.

Kühlung durch mechanische Lüftung?

Der **Einsatz des mechanischen Lüftungssystems** für die Sommerkühlung hat enge Grenzen. Eine Verdopplung der Luftwechselrate während der Nachtstunden erfordert, dass die Anlage dementsprechend ausgelegt wurde. Eine auf die hygienischen Mindestanforderungen dimensionierte Lüftung ist im EFH meist bei einer Luftwechselrate von 0,5 bis 0,6 1/h am oberen Anschlag ihrer Leistungsfähigkeit. Hierbei ist mit einer Vervierfachung des Strombedarfs und mit Geräuschemissionen zu rechnen, die die Nachtruhe stören. Gleichwohl kann dort, wo durch minimierte Fensterflächen oder wirksame Verschattungsmaßnahmen die Kühllast deutlich reduziert wurde, durch eine **nachtorientierte Steuerung der Anlage** der Komfort verbessert werden.

Der Einsatz eines **Erdwärmetauschers** hat entgegen der immer wieder verbreiteten Meinung im Sommer nur einen geringen Effekt. Dies hat mehrere Gründe: Der EWT kann nur soweit zur Kühlung beitragen, wie es im Rahmen eines (geringen) Grundluftwechsels möglich ist. Eine Reduzierung der Zulufttemperatur bringt diese Lüftungsstrategie meist nur tagsüber. Gegenüber einer natürlichen Nachtlüftung lässt sich nicht viel einsparen, da die Austrittstemperatur hinter der Anlage nur geringfügig - wenn überhaupt - unter den üblichen Nachtlufttemperaturen liegt.

Seine Kühlleistung reicht nicht aus, wie dynamische Simulationen des PHI zeigen, um die Maximaltemperaturen in Hitzeperioden nennenswert zu verringern, vgl. [AkkPH 2003]. Die Übertemperaturhäufigkeit bezogen auf die 25°C- Grenze lässt sich hiernach allerdings um 3- 4%-Punkte senken. Ein eher bescheidener Effekt. Sollte sich das Klima in Region C im Verlauf der nächsten Jahrzehnte in Richtung auf die heutigen mediterranen Verhältnisse entwickeln, dann wird man über die Nutzung der Erdkühle möglicherweise neu nachdenken und nachrechnen müssen.

Die geplante Nachtlüftung

Für eine gezielte und vom Nutzer einfach zu bedienende Nachtlüftung darf ein bisschen Planung sein. Als besonders wirksamer Lüftungspfad war in Abb. 3 bereits der thermische Auftrieb zwischen den Geschossen angesprochen worden. Um den „Kamin-Effekt“ über das Treppenhaus zu nutzen, können **spezielle Lüftungsklappen in die Fensterkonstruktion integriert** werden.

Für zwei mögliche Arten dieser Lüftungsöffnungen haben wir deren Wirksamkeit mit dem PHPP untersucht. Wird die Lüftungsöffnung z. B. am seitlichen Fensterrand als **vertikaler Schlitz** eingebaut (lichtes Maß: 2,00 * 0,13 bis 0,25 m), so tritt bereits ohne Höhenunterschied ein thermisch angetriebener Lüftungseffekt über die Querschnittshöhe ein. Abb. 5 links zeigt, dass hierdurch ein Beitrag zur Nachtluftwechselrate, von immerhin 0,15 bis 0,30 1/h erreicht werden kann, wenn zwei derartige Öffnungen in der angegebenen Größe während der 12 kühleren Stunden des Tages geöffnet werden. Liegen die Öffnungen um ein Geschoss versetzt, so steigt die Luftwechselrate zu Kühlung des Gebäudekerns auf 0,25 bis 0,50 pro Stunde.

Ordnet man den **Lüftungsspalt horizontal** an, z. B. in der Fensterbrüstung bzw. am oberen Fensterrand (vgl. Abb. 5 rechts), so kann man den Höhenunterschied optimal ausnutzen. Im Erdgeschoss unter dem Fenster und im Obergeschoss oberhalb hiervon wird über eine Höhendifferenz von 5 m der größte Luftaustausch (fast 0,7 1/h) erreicht.

Es sollte für Planer reizvoll sein, dass für diese einfache Kühltechnik die notwendigen Flächen nur $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{2}$ m² betragen.

- D.h. mit 10 bis 25 cm Spaltbreite bzw. Länge kann ein Lüftungssystem konstruiert werden, dass die Einhaltung aller Anforderungen zur Senkung der Übertemperaturstunden einhält.

Angesichts der geringen Querschnittsflächen ergibt sich der Einbruchschutz von selber oder kann einfach gesichert werden. Für Technikfreunde ließe sich das Öffnen und Schließen auch motorisch antreiben und automatisieren.

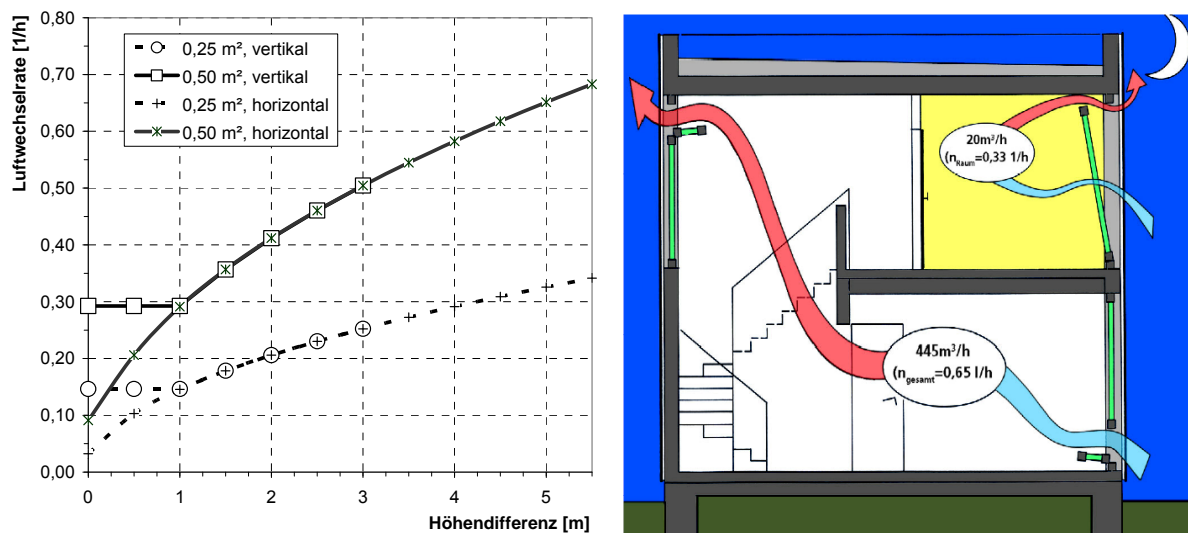


Abbildung 5 links: Nachtlüftungsrate durch geplante Lüftungsöffnungen in Abhängigkeit von deren Größe, Orientierung und der Höhendifferenz.

Rechts: Nachtluftwechsel am gekippten Fenster und optimale Anordnung von horizontalen, spaltförmigen Lüftungsöffnungen. In Klammern: Beitrag der jeweiligen Lüftungsmaßnahme zum tagesmittleren Sommerluftwechsel - für das Gesamtgebäude (bei Thermiklüftung) bzw. für den betreffenden OG-Raum (bei Kippfenster).

5. ... und was bringt die Masse?

Beim PHPP wird die innere Gebäudemasse durch einen wohnflächenbezogenen Kennwert abgebildet. Das Verfahren geht davon aus, dass auch ein extremer Leichtbau je m² Wohnfläche eine Mindestspeicherkapazität von 60 Wh/(K *m²) besitzt. Für jede der sechs umschließenden Oberflächen kann die Speicherkapazität um je 24 Wh/ (K*m²) erhöht werden. Für ein voll massives Gebäude kommen auf diese Art und Weise maximal 204 Wh/ (K*m²) zusammen. Da das untersuchte Holzhaus in allen Räumen einen massiven Estrich hat, wurde in allen bislang untersuchten Varianten von einer rechnerischen Speicherkapazität auf 84 Wh/(K*m²) ausgegangen.

Im Rahmen von umfangreichen Messungen an realen Objekten und systematischen **dynamischen Simulationsrechnungen** wurde vom PHI auch der Parameter „Gebäudemasse“ detailliert untersucht, s. Literaturliste [3] bis [5] und [10]. Am Beispiel des PH DA-Kranichstein ergab sich zwischen Massivbau und reinem Holzbau ein Unterschied bei den Überhitzungsstunden (25°C) in Höhe von 7%-Punkten im Basisfall (10,7% statt 17,7%). Die Maximaltemperaturen betragen 30°C im Massivbau und sogar 33°C im Leichtbau. Also zwei unkomfortable Bauweisen? Die eine noch schlechter als die andere?

Nein: Entscheidend für die ungemütlichen Ergebnissen war der Ansatz, dass auch im Sommer nur mit der Abluftseite der Lüftungsanlage gelüftet wird. Bei der Simulationsvariante mit zusätzlicher Fenster- Kipp- Lüftung sinken die Übertemperaturzeiten auf 0,7% bzw. 3,7% und schrumpft der Abstand zwischen beiden Bauweise auf 3 %-Punkte. Die Maximaltemperaturen der Raumluft liegen im nun besser belüfteten Haus auch bei Holzbauweise nur noch bei 27°C.

Die Sommerfallanalyse mit dem PHPP ist keine dynamische Simulation und kein Mehrzonenmodell mit integrierten Luftströmungsalgorithmen. Da jedoch in dem statischen Einzonenmodell des PHPP Sommerblattes die gebündelte Mess- und Simulationserfahrung des PHI steckt, führte unsere planerische Parameterstudie (weitgehend) zu plausiblen Ergebnissen.

Die abschließende Tabelle 5 fasst die Ergebnisse unter Einbeziehung des Masseeffektes zusammen.

Energiestandard	Bauweise	Speicherkapazität [Wh/(K*m²)]	Ohne temp. Verschattung		Temporäre Verschattung 50%	
			Grundlüftung (n= 0,32 1/h)	Zusätzliche Nachtlüftung (n= 0,30 1/h)	Grundlüftung (n= 0,32 1/h)	Zusätzliche Nachtlüftung (n= 0,30 1/h)
NEH	Holzbau	84	16.7%	7.0%	8.9%	3.8%
	Massivbau	204	15.5%	5.0%	8.6%	1.7%
PH	Holzbau	84	34.6%	7.1%	19.4%	4.1%
	Massivbau	204	33.7%	5.9%	17.6%	1.7%

- **Ohne Verschattung** und nur mit (geringer) Grundlüftung entsteht ein unakzeptables Sommerklima im Haus. Egal wie viel Masse es hat.
- **Mit außen liegenden temporären Verschattungseinrichtungen** (und Grundlüftung) kann nur im NEH die Mindestanforderung (max. 10% > 25°C) erreicht werden.
- Eine **gezielte Nachtlüftungsstrategie** ermöglicht auch ohne zusätzliche Verschattungsmaßnahmen in allen Fällen ein erträgliches Sommerklima.
- Mit **Verschattung und Nachtlüftung** wird bei allen Baustandards und Bauweisen die Komfortbedingung (max. 5% > 25°C) erfüllt.
- Bei den grundsätzlich empfehlenswerten Varianten ist ein **Unterschied zwischen Holz- und Massivbau** erkennbar. Die Differenz von 1 bis 2,5 %-Punkten ist allerdings marginal im Vergleich zu den Effekten der anderen Einflussfaktoren.

Fazit

Der Holzbau braucht sich wegen seiner geringeren **Masse** nicht wirklich Sorgen machen (lassen). Er kann **Klasse** beweisen, in dem die (solaren) Wärmelasten minimiert und Planungszintelligenz darauf verwendet wird, den Nutzern ein natürliches Kühlsystem durch Nachtlüftung an die Hand zu geben. Dieses kann mit PHPP objektspezifisch einfach dimensioniert werden und macht den Zukauf von Strom fressenden Klimageräten überflüssig.

6. Literatur

- [1] [Borsch-Laaks / Wagner 2004]
Robert Borsch- Laaks und Gerhard Wagner: Ist das Sommerklima berechenbar? Teil 1: Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108-2. In: die neue quadriga Heft 3/ 2004, Wolnzach, Verlag Kastner
- [2] [DIN 4108-2:2003]
NA Bau, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, Berlin (Beuth-Verlag) 2003-07
- [3] [AKkPH 2001]
Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser - Phase II, Passivhaus- Sommerfall, Protokollband Nr. 15, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2001, 2.Auflage
- [4] [AKkPH 2003]
Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser - Phase II, Lüftungsstrategien für den Sommer, Protokollband Nr. 22, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2003
- [5] [CEPHEUS 2001]
CEPHEUS: Sommerliches Innenklima im Passivhaus Geschosswohnungsbau- Kassel Marbachshöhe, Fachinformation PHI-2001/11, Darmstadt 2001
- [6] [Endres / Kindermann 2000] Edmund Endres und Peter Kindermann: Sommerlicher Wärmeschutz - Die wichtigsten Einflussfaktoren. Hg. IVPU – Industrieverband Polyurethan-Hartschaum e.V., Stuttgart 2000.
- [7] [Hauser / Otto 1999] Gerd Hauser und Frank Otto: Holzspäne - Dämmstoff mit hoher Wärmespeicherfähigkeit. In: bauen mit holz, Heft 8 / 1999
- [8] [Hinrichs / Holm 2008] Jan Peter Hinrichs / Andreas Holm: Thermische Untersuchungen an einem Metalldach mit Zwischensparrendämmung aus Mineralwolle und Holzfaserdämmplatten. In: wksb 60 / 2008.
- [9] [Kempkes 2008] Christoph Kempkes: Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes durch Holzfaser- und Phasenwechselmaterialien. In: Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung (Hg.): Tagungsband 40. Fortbildungskurs 2008 in Weinfelden, Zürich (Lignum), 2008
- [10] [PHI 1998]
Passivhaus Institut (Hg.): Passivhaus Sommerklima Studie, Fachinformation PHI-1998/10, Darmstadt 1998.
- [11] [PHPP 2007]
Passivhaus-Institut (Hg.): Passivhaus ProjektierungsPaket, PHI Darmstadt 2002/2004/ 2007. www.passiv.de
- [12] [Ragonesi / Zweifel 2002] Marco Ragonesi und Gerhard Zweifel: Holzbauten- Wärmeschutz im Sommer. In: Schweizer Holzbau, Heft 7/8 2002.
- [13] [Spitzner 2008] Spitzner, Martin H.: Im Winter warm, im Sommer heiß? In: Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung (Hg.): Tagungsband 40. Fortbildungskurs 2008 in Weinfelden, Zürich (Lignum), 2008