

Dr. Wolfgang Feist
 Passivhaus Institut
 Rheinstraße 44/46
 D-64283 Darmstadt
 Tel. +49 (0) 6151 / 82 699-0
 Fax +49 (0) 6151 / 82 699-11
 info@passiv.de
 www.passiv.de

Sommerlicher Wärmeschutz am Passivhaus Konzepte und Beispiele

Grundlagen: Behaglichkeitskriterien

Für den Bauphysiker und Klimatechniker sind es auch im Sommer **dieselben vier Parameter**, die das Raumklima an einem gegebenen Ort bestimmen (vgl. [AkkP 25] [Fanger 1970] [DIN EN ISO 7730]):

ϑ_a Lufttemperatur

ϑ_r Strahlungstemperatur

v_{ar} relative Luftgeschwindigkeit und

p_a Wasserdampfpartialdruck

Wie für den Fall der Heizung bilden diese Größen zusammen mit der Aktivität M und der Bekleidung (gekennzeichnet durch den cloth-Wert I_{cl}) einen vollständigen Satz von messbaren Parametern, welche die Behaglichkeit charakterisieren. Die Bewertung erfolgt über das vorausgesagte mittlere Votum („predicted mean vote“) PMV, das sich nach dem Stand von Forschung und Normung aus

$$PMV = (0.303 e^{-0.036 M / [W/m^2]} + 0.028) ((M - W) - q_{akt, Beh}) / [W/m^2]$$

berechnen lässt. Dabei bezeichnet M den Energieumsatz der Person („Aktivität“), W die geleistete mechanische Arbeit und $q_{akt, Beh}$ diejenige Wärmeabgabe, bei der unter den gegebenen Randbedingungen optimale thermische Behaglichkeit vorliegt – d.h. die Zahl der Unzufriedenen am geringsten ist. Die zur Behaglichkeitsbedingung gehörende Aktivität und $q_{akt, Beh}$ wird mittels einer thermischen Energiebilanz des menschlichen Körpers aus den aufgeführten vier Parametern des Klimafeldes und der Kleidung bestimmt.

+3	hot	zu warm	Tabelle 1: International eingeführte Bewertungsskala nach Fanger für die thermische Behaglichkeit; gilt für den Sommer wie Winter (DIN EN ISO 7730; erklärt in [AkkP 25])
+2	warm	warm	
+1	slightly warm	etwas warm	
0	neutral	neutral	
-1	slightly cool	etwas kühl	
-2	cool	kühl	
-3	cold	kalt	

Anwendung auf die Behaglichkeit im Sommerfall

Einer der Vorteile der Fanger'schen Theorie ist, dass die Behaglichkeitskriterien für den Heiz- und für den Kühlfall gleich formuliert sind. Es ist aber ein Irrtum, dies damit zu identifizieren, dass die Bedingungen an die Raumklimaparameter wie z.B. Raum-

lufttemperatur gleich sind. Wie sie sich ändern, wird durch die veränderten Kleidungs-
gewohnheiten im Sommer gegenüber dem Winter vorgegeben.

Für eine Aktivität von $M = 1.2$ met, d.h. normale sitzende Bürotätigkeit, ergeben sich
folgende typische Werte für den Winter / bzw. den Sommer:

- (i) Winter, Winterkleidung $I_{cl} = 1.10$ clo $\vartheta_{op,opt} = 20.94$ °C
(ii) Sommer, Sommerkleidung $I_{cl} = 0.52$ clo $\vartheta_{op,opt} = 24.33$ °C

wobei jeweils keine nennenswerte Luftgeschwindigkeit ($v_{Luft} \leq 0.1$ m/s) und eine relative
Luftfeuchtigkeit von 50% angenommen wurden. Die „typische Sommerkleidung“ ist
dabei in Tabelle 2 dokumentiert. Es gäbe hier durchaus noch weitere Spielräume, den-
nen jedoch die heutige „Kleiderordnung“ entgegensteht; würden „Shorts“ und „T-Shirt“
akzeptiert, so sind sogar $I_{cl} = 0.31$ clo erreichbar. Fragen der Kleiderordnung sind be-
kanntermaßen stark von anderen Gesichtspunkten als der Behaglichkeit abhängig (vgl.
die Diskussion über den „Krawattenerlass“ in Japan [geo 2005]).

Kleidung	I_{cl} in clo
kurze Unterhose	0.03
Unterhemd, ärmellos	0.06
Kurzärmeliges Hemd	0.09
leichte Hose	0.2
Socken	0.02
Schuhe, dünne Sohle	0.02
Stuhl mit Stoffüberzug	0.10
SUMME Sommerkleidung	0.52

Tabelle 2: Typische Sommerbekleidung (männliche Person;
[DIN EN ISO 7730] ergänzt)

Nach ISO 7730 sind die Toleranzen im Sommer nicht deutlich höher als im Winter
(± 1.8 K für noch zulässige Auslegungen) und für Komfort-Klasse A ergibt sich zu
 $|\Delta PMV| < 0.2$ eine zulässige Abweichung von $|\Delta \vartheta_{op}| < 0.8$ K. Die noch als Bestbewertung
zählenden Temperaturen liegen daher zwischen 23.5 und 25.1 °C.

Dazu kommen Bedingungen bzgl. der zulässige Schwankungen der operativen Tem-
peratur in Raum und Zeit:

$$\Delta \vartheta_{op} = \pm 0.8 \text{ K (max.)}$$

Die notwendige Begrenzung des Zugluftrisikos auf $DR < 8\%$ ist wegen der höheren
Temperaturen etwas weniger eng:

$$v_{Luft} \leq 0.10 \text{ m/s.}$$

Bzgl. Strahlungstemperatur-Asymmetrie (Decke/Boden) muss unverändert gelten:

$$|\Delta \vartheta_{r,ass}| \leq 5 \text{ K.}$$

Der vertikale Lufttemperaturunterschied zwischen Kopf und Fußknöchel bei einer sit-
zenden Person sollte

$$|\Delta \vartheta_{1.1,0.1m}| \leq 2 \text{ K sein.}$$

Ebenfalls bedeutend ist jedoch für den Sommerfall die Einhaltung einer maximalen
Raumluftfeuchtigkeit (Schwülegrenze); diese ist im Winter aus praktischen Gründen
ohnehin nicht erreichbar (sehr trockene Frischluft), im Sommer muss aber generell
absolute Luftfeuchtigkeit $\leq 11,5$ g/kg

gelten. Das entspricht einer Taupunkttemperatur von 16.8 °C, d.h. 100% relativer Luftfeuchte in Luft von 16.8 °C. Diese Bedingung ist u.U. auch in Deutschland nicht immer automatisch erfüllt; es gibt eine Anzahl von „Schwületagen“ in einigen Klimazonen.

Sommerlösungen – Essentials

Im Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Nr. 15 standen rein passive Maßnahmen und die Analyse, welches sommerliche Innenklima sich in einem Passivhaus in Mitteleuropa bei Beachtung üblicher Passivhaus-Planungsregeln ergibt, im Mittelpunkt. Die Erkenntnisse wurden in 8 Merkpunkten für das Erreichen guter sommerlicher Behaglichkeit in Wohngebäuden und *ohne aktive Kühlung in Mitteleuropa* zusammengefasst:

I. Besserer Wärmeschutz kann die Sommerbehaglichkeit verbessern.

II. Die balancierte Passivhauslüftung sollte im Sommer in der Regel *ohne Wärmerückgewinnung* (d.h. Zuluft außer Betrieb nehmen oder Bypass oder Sommerkassette verwenden) betrieben werden.

III. Sehr wirkungsvoll ist das bewusste Sommerlüften bei Bedarf mit gekippten Fenstern.

IV. Insbesondere eine verstärkte freie Lüftung in der Nacht ist empfehlenswert.

V. Die Solarapertur ist die wichtigste Einflussgröße nach der Lüftung.

VI. Als sehr effizient stellt sich eine außen liegende temporäre Verschattung heraus.

VII. Gebäude mit größerer innerer Masse sind im Sommer etwas leichter kühl zu halten.

VIII. Das Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) spielt bei passivhaustypischer Wärmedämmung (U-Werte kleiner gleich 0,15 W/(m²K)) keine Rolle mehr.

In Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Nr. 22 wurde für eine entscheidende Maßnahme, nämlich die zusätzliche Sommerlüftung, eine praktisch einsetzbare Planungshilfe entwickelt (Verfahren „Sommluft“). Diese erlaubt die Abschätzung der durch Fensteröffnen (Kippen oder Flügelöffnung) erreichbaren passiven Luftwechselraten in Hitzeperioden und damit die Dimensionierung eines rein passiv gekühlten Gebäudes in Mitteleuropa.

Beide Arbeitskreise hatten die aktive Kühlung (bis auf den Einsatz des Sonderelementes Erdreichwärmetauscher EWT) bewusst außer Acht gelassen. Tatsächlich stellte sich auch heraus, dass zumindest Wohngebäude in Mitteleuropa als Passivhäuser mit nur wenigen Ausnahmen so projektiert werden können, dass sie ein sehr komfortables Innenklima erreichen, ohne eine aktive Klimatisierung zu benötigen.

Nun gibt es beim Passivhaus keine zwingende Beschränkung auf eine Gebäudetechnik ohne aktive Kühlung. Das heißt nicht, dass die rein passive Strategie gescheitert wäre oder gar dass wir von ihr Abschied nehmen wollen. Sie ist nach wie vor die Strategie der ersten Wahl, wenn sie sich mit vertretbarem (auch ökonomisch vernünftigem) Aufwand realisieren lässt, was bei Wohngebäuden in aller Regel der Fall sein wird. Es heißt ausschließlich, dass wir eine Strategie auch für die Fälle bereitstellen wollen, in denen eine aktive Kühlung doch eingesetzt werden soll, nämlich

- weil besonders hohe, nicht mit vertretbaren Maßnahmen reduzierbare innere Lasten vorliegen,
- weil eine erhöhte Sommerlüftung aus rechtlichen, sicherheitstechnischen oder Umfeldgründen (Umgebungsärm) nicht möglich ist,
- weil besonders hohe Behaglichkeitsansprüche vorliegen
- oder aus anderen besonderen Gründen.

Entscheidend wird aber sein, dass der evtl. noch bestehende Kühlbedarf extrem gering, geradezu vernachlässigbar gering sein muss – um umweltschonend, nachhaltig und kostengünstig bereit gestellt werden zu können, wie es analog auch schon bei der Heizung der Fall ist.

Ein Grundsatz ist so entscheidend wichtig, gleichgültig ob eine rein passive Sommerstrategie oder eben doch ein hocheffizientes Kühlsystem verwendet wird, dass ihm im folgenden ein eigenes Kapitel gewidmet wird:

Reduktion von inneren Wärmequellen

Was sind die wichtigsten Grundsätze für das energieeffiziente Erreichen eines behaglichen sommerlichen Innenklimas? Antwort:

1. Die Vermeidung und Reduktion von inneren Wärmequellen,
2. die Vermeidung und Reduktion von inneren Wärmequellen,
3. ...

Viele Planer hören diesen Grundsatz aus leicht verständlichen Gründen nicht gern: Haben sie doch (vermeintlich) keinen Einfluss auf diese Bestimmungsgröße und sind im Grunde sogar froh, dass sich zumindest dieses Feld nicht auch noch in ihrem Verantwortungsbereich befindet. Das sehen und akzeptieren wir – allein es ändert nichts daran, dass die inneren Wärmequellen neben Lüftung und Verschattung den höchsten Einfluss auf das Innenklima besitzen.

Warum ist die Reduktion innerer Wärmequellen so wichtig?

Die Konsequenzen höherer innerer Wärmequellen bzgl. des Sommerverhaltens sind gleich von mehrfacher Natur:

▪ **Stromkosten**

Höhere interne Wärmequellen haben ihre Ursache in einem höheren Energieverbrauch von Systemen, die in den Aufenthaltsräumen betrieben werden. Überwiegend handelt es sich dabei um Elektroenergie; wird die innere Wärmelast im Tagesdurchschnitt um 1 W/m^2 erhöht, so sind dies

$$1 \text{ W/m}^2 \cdot 8.76 \text{ kh/a} \cdot 0.17 \text{ €/kWh} = 1.49 \text{ €/(m}^2\text{a)}$$

zusätzliche direkte Betriebskosten.

▪ **Betriebskosten der Klimatisierung**

Höhere interne Wärmequellen müssen, wenn ein aktives Kühlkonzept installiert wird, grundsätzlich zusätzlich „weggekühlt“ werden. Ganz grob kann man von 2400 h Betriebszeit der Kühlung und einer Kältezah 2 ausgehen. Zu einer zusätzlichen inneren Wärmelast von im Tagesdurchschnitt 1 W/m^2 gehören dann

$$1 \text{ W/m}^2 \cdot 2.40 \text{ kh/a} \cdot 0.17 \text{ €/kWh} / 2 = 0.20 \text{ €/(m}^2\text{a)}$$

zusätzliche indirekte Betriebskosten.

▪ **Installationskosten der Klimaanlage**

Konventionelle Klimaanlage verteuern sich etwa um 0.50 €/W je zusätzlich zu installierendem Watt Kühlleistung.

Daraus ergeben sich einschl. direkter Stromkosten und Betriebskosten Gesamtkosten in Höhe von 1.74 €/W/a je zusätzlichem durchschnittlichem Watt an inneren Wärmequellen. Bei z.B. 100 Watt Leistungsdifferenz sind dies 174 €/a und somit je nach Nutzungszeit des elektrischen Gerätes mehrere Hundert Euro Barwert an Kosteneinsparung. Die möglichen Kosteneinsparungen sind aber in der Praxis noch weit höher:

Wenn es z.B. möglich ist, statt einer konventionellen Klimatisierung mit einer Betonkerntemperierung (BKT) auszukommen, so verringern sich die Investitionen für Klimatisierung um über 40% der *gesamten* Systemkosten. BKT ist aber nur einsetzbar, wenn die inneren Wärmequellen auf Werte unter $370 \text{ Wh/(m}^2\text{d)}$ begrenzt werden. An dieser Stelle gibt es dann einen ersten deutlichen Kostensprung nach unten.

Können die inneren Wärmequellen auf Werte von in der Tagessumme weniger als $100 \text{ Wh/(m}^2\text{d)}$ begrenzt werden, so ist sogar die Kühlung allein mit der Zuluft der mechanischen Lüftungsanlage möglich (vergleichbar der reinen Zuluftheizung beim Passivhaus). Die zusätzlichen Investitionen für die Kühlung sind dann extrem gering und entsprechend konzipierte Gebäude können sehr wirtschaftlich gebaut und betrieben

werden. Dieses Konzept ist aber definitiv nur umsetzbar, wenn gegenüber dem heutigen Standardfall sehr stark reduzierte innere Wärmelasten erreicht werden. Andererseits sind die Spielräume deutlich höher als bei einer Beschränkung auf Maßnahmen allein der passiven Kühlung.

Wie können innere Wärmelasten reduziert werden?

Messungen der Aufteilung des Stromverbrauchs in üblich ausgestatteten Büros zeigen, dass die größten ‚Stromfresser‘ die Computerbildschirme sind. Die heute immer noch überwiegend eingesetzten Röhren- oder CRT-Monitore weisen im Betrieb Leistungen zwischen 50 und 150 W auf und sie ziehen selbst im Leerlauf meist noch bedeutende Leistungen. Moderne TFT-Monitore haben einen erheblich geringeren Stromverbrauch, die Reduktion beträgt fast 75% im Betrieb. Auch der Stromverbrauch der durchschnittlich üblichen Arbeitsplatzrechner ist mit 50 bis über 100 W je Arbeitsplatz sehr hoch. Dass mit ganz erheblich kleinerer Stromaufnahme vergleichbare Arbeitshilfen geleistet werden können, zeigt die Notebook-Technik. Gemessen wurde an einem handelsüblichen Notebook eine Leistungsaufnahme von 10 W (ohne Monitor) im normalen Bürobetrieb. Ein weiterer hoher Posten beim Stromverbrauch im Büro wird durch die künstliche Beleuchtung gestellt. Neben verbesserten Lampen und Leuchttechnologien gibt es hier Effizienzpotentiale vor allem durch eine verbesserte Regelung: steuerbare elektronische Vorschaltgeräte erlauben das nach Beleuchtungsstärke geregelte Dimmen der künstlichen Beleuchtung. Eine vielfältig einsetzbare Technologie zur effizienteren Energienutzung sind Schaltnetzteile. Das Kernproblem bei den meisten übrigen Büroanwendungen liegt in deren im Durchschnitt hohen Standby-Verlusten. Von diesen wiederum wird der überwiegende Teil durch die Netzteile bestimmt. Die Standby-Verluste neuer Schaltnetzteile liegen weit unter 1 W und die Wirkungsgrade bei Nennleistung sind deutlich höher als bei konventionellen Netzteilen. Als geradezu ärgerlich hoher Energiekonsument und damit Quelle von internen Lasten hatte sich im Passivhaus-Bürogebäude von Wagner&Co. in Cölbe die Telefonzentrale herausgestellt. Über 1000 W wurden an der Zentraleinheit für 60 Telefoneinheiten gemessen, unabhängig davon, ob telefoniert wurde oder nicht. Je Telefon ergibt sich in alten Anlagen typischerweise eine Dauerleistung von 20 W. Dass es auch ganz erheblich effizienter geht, zeigen moderne Schnurlostelefone: Trotz des hohen Komforts, den diese Anlagen bieten, liegt die elektrische Leistungsaufnahme insgesamt bei unter 1 W/Phone. In Abbildung 1 sind die Unterschiede der inneren Lasten bei einem konventionellen Büro (rechts, Summe 9.4 W/m² durchschnittliche IWQ) zu einem mit moderner energieeffizienter Technik ausgestatteten Büro (links, Summe 3.6 W/m²) dargestellt.

Allein ein Vergleich der Investitionskosten zeigt, dass die Reduktion von inneren Wärmelasten die kostengünstigste Alternative zur Installation einer Klimaanlage ist. Werden auch noch die Betriebskosten einbezogen, so ergeben sich je Büroarbeitsplatz Betriebskosteneinsparungen von 73 €/a [AkkP 31]. Das sind, ebenso wie die zugehörigen Investitionen, keine hohen Beträge – weshalb es auch nicht verwundert, warum solchen Maßnahmen derzeit trotz ihrer Wirtschaftlichkeit wenig Aufmerksamkeit geschenkt wird.

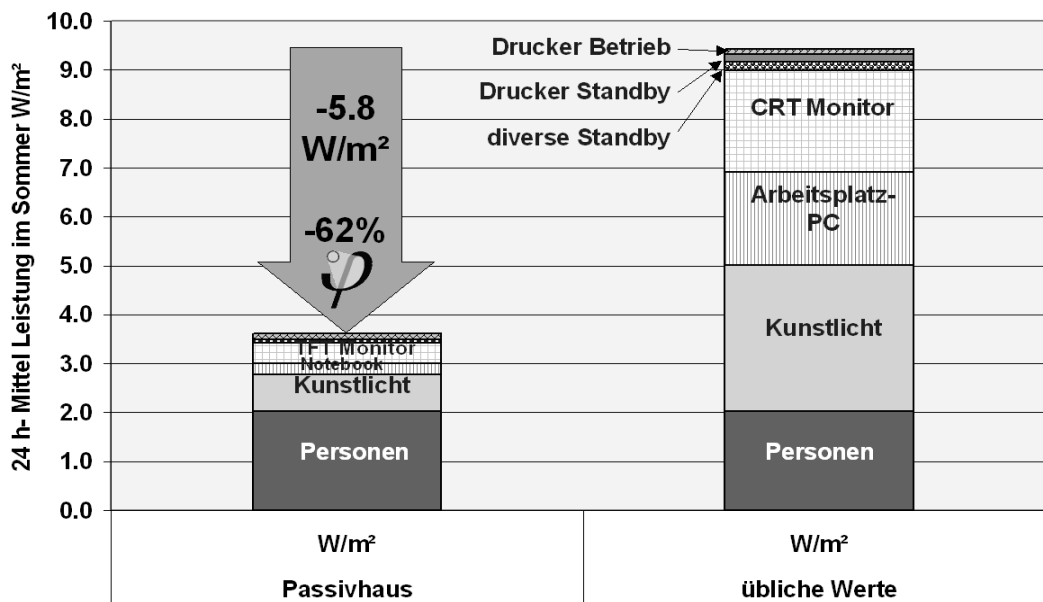


Abbildung 1: Mit den hier beschriebenen Techniken mögliche Reduktion der inneren Wärmelasten in einem typischen Bürogebäude. Der Schritt vom Tagesdurchschnitt 9.4 W/m^2 auf 3.6 W/m^2 ermöglicht es, auf eine aufwändige konventionelle Klimatisierung und sogar auf eine BKT zu verzichten; im links dargestellten Fall kommt man vielmehr mit der ohnehin vorhandenen Passivhaustechnik (Lüftungsanlage mit WRG) und einem sehr kostengünstigen Luftkühler aus.

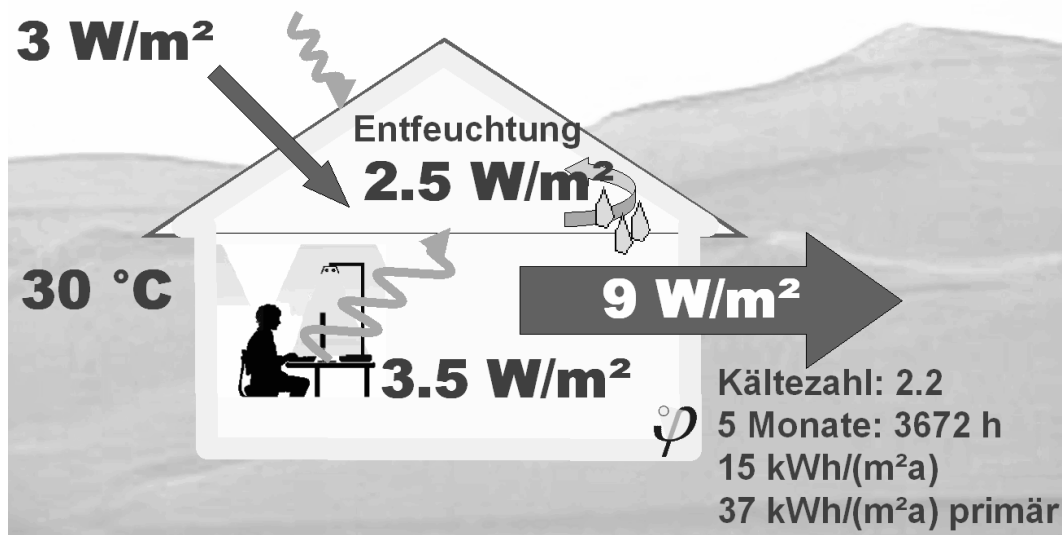


Abbildung 2: Kühllastfall im Passivhaus unter Härtebedingungen: Auch wenn die rein passive Kühlung nicht mehr ausreicht, kann mit einer sehr geringen Kühlleistung (Zuluftkühlung der ohnehin vorhandenen Lüftungsanlage) eine gewisse innere Last bewältigt werden. Bei etwa 9 W/m^2 liegt die Obergrenze bei einem Bürogebäude inkl. Entfeuchtungsleistung. Selbst in einem streng heißen Klima bleibt dann der Primärenergiebedarf im Rahmen.

Passivhaus-Konzept im Kühlfall

Wenn die klimatischen Randbedingungen für den Sommerfall härter werden – z.B. durch eine Verstärkung des Klimawandels – und die mittleren Außentemperaturen längere Zeiträume über den behaglichen Werten liegen, dann werden die einfachen Konzepte zur passiven Kühlung oft nicht mehr ausreichen. In diesem Fall kann man versuchen, aufwändigere Konzepte der passiven Kühlung einzusetzen:

- Erdreichkopplung (vgl. Erdreichwärmetauscher in [AkkP 15] und [AkkP 22]),
- Strahlungskühlung (vgl. Beitrag von Dr. Büttner in [AkkP 31]),
- Verdunstungskühlung

oder auf aktive solare Kühltechnologien zu setzen.

Mit dem Passivhaus-Konzept eröffnet sich aber noch ein anderer Weg: Eine gewisse aktive (konventionell oder mit erneuerbarer Energie betriebene) Kühlung, die aber einen nur geringen apparativen Aufwand benötigt.

Der zentrale Planungsansatz ist dabei analog wie bei der Heizaufgabe: Wie kann die *Kühlung* realisiert werden, ohne einen bedeutenden zusätzlichen investiven Aufwand tätigen zu müssen? Genutzt werden sollten daher möglichst die Komponenten, die in einem Gebäude ohnehin gebraucht werden. Das sind

- die Gebäudehülle (denn ohne Hülle kann das Raumklima nicht mit vertretbarem Aufwand wesentlich behaglicher eingestellt werden) und
- die Hygienelüftung (denn ohne hygienisch ausreichende Lüftung ist ein gesundheitlich vertretbarer Aufenthalt von Personen in Räumen nicht möglich).

Analog zum Heizfall bringt bei heißen Außenklimabedingungen im Kühllastfall der hygienisch erforderliche Luftwechsel eine zusätzliche Wärmelast mit sich (im Kühllastfall oft nicht nur an fühlbarer Wärme, sondern auch noch an latenter Wärme in als schwül empfundener Außenluft). Unter solchen Umständen ist es günstig, den hygienisch erforderlichen Luftaustausch nicht zu überschreiten und eine Wärmerückgewinnung und sogar eine Feuchterückgewinnung (nämlich für die Außenluftfeuchte, von innen wirksam wie eine „Trocknung“) vorzunehmen. Wenn die betreffenden technischen Komponenten im Winterfall auch genutzt werden können (nämlich als Wärme- und Feuchterückgewinnung) ergibt sich ein weiterer Synergieeffekt. Jede Form von Klimaanlage wird energiesparender arbeiten, wenn eine solche Enthalpierückgewinnung eingesetzt wird. Aus der konventionellen Klimatechnik ist allerdings bekannt, dass sich der Einsatz der Enthalpierückgewinnung nach gängiger Auffassung nur bei entsprechend großen und oft genutzten Anlagen „lohnt“. Dies gilt für das Basisparadigma, dass eine konventionelle Klimaanlage eingesetzt wird und die Enthalpierückgewinnung eine zusätzliche Investition ist, die der Energieeinsparung dient.

Wie im Heizfall ändert sich das Bild aber dann, wenn wir das Ausgangsparadigma anders wählen: Gehen wir von einer aus hygienischen Gründen erforderlichen Lüftungsanlage allein für die Lufterneuerung aus, so ist die dazu erforderliche Anlage zwar auch nicht kostenlos, sie hat aber erheblich geringere Investitionskosten als eine konventionelle Klimaanlage.

Wie im Heizfall stellen wir nun wieder die Frage, inwieweit mit der aus hygienischen Gründen und nach hygienischen Gesichtspunkten dimensionierten Lüftungsanlage ohne hohen Aufwand auch eine gewisse Kühlleistung erbracht werden kann. Und wie im Heizfall kann diese Frage positiv beantwortet werden: Natürlich kann die nach hygienischen Gesichtspunkten projektierte Frischluft im Zuluftstrom gekühlt werden und damit den Aufenthaltsräumen eine gewisse Kühlleistung zugeführt werden. Damit verbunden kann die Frischluft auch, wenn sich das als notwendig erweist, im Zuluftstrom entfeuchtet werden. Das einzige zusätzliche Element, das im Lüftungssystem zu diesem Zweck benötigt wird, ist ein Luftkühler im Zuluftstrang. Der Luftkühler kann auf Kaltwasser- oder Kältemittelbasis beruhen – wegen der i.a. kleineren erforderlichen Leistung kann ein für den Winterfall vorhandenes Heizregister als Luftkühler mit verwendet

werden (Tauwasserablauf und zugehörige Hygienefragen müssen allerdings beachtet werden). Es leuchtet unmittelbar ein, dass mit einem solchen Konzept nur sehr geringe „Zusatzinvestitionen“ für die Kühlung entstehen.

Allerdings: Wiederum wie im Heizfall ist die Kühlleistung, die mit einem solchen System bereitgestellt werden kann, in der Regel nur gering. Wie im Passivhaus-Frischluff-Heizkonzept sind auch in einem solchen Frischluft-Kühlkonzept besondere Anforderungen an die Effizienz der Gebäudehülle, der Wärme- und Feuchterückgewinnung sowie an die Begrenzung der inneren Wärmelast zu stellen.

Wie im Heizfall ergeben sich durch die systembedingten Grenzen funktionale Anforderungen an die Gebäudehülle, die Höhe der Enthalpierückgewinnung und eine Begrenzung der inneren Lasten. Daraus ergeben sich sehr klein dimensionierte Systeme für die Kühlung – und dies führt wieder wie im Heizfall zu einem automatisch sehr geringen Energieverbrauch für die Kühlaufgabe.

Dass ein solcher Ansatz zu interessanten Lösungen führen kann, wird in Abbildung 2 illustriert. Hier wird ein Passivhaus-Bürogebäude in einem schon als „subtropisch“ anzusehenden Klima mit anhaltenden *Tagesmittelwerten* der Außentemperatur von 30 °C (das heißt Tagesspitzen um 40 °C) betrieben. Nimmt man Passivhausqualitäten der Gebäudedämmung ähnlich wie in Deutschland an ($U_{Tr,m} \leq 0.2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ inkl. Fenster für den mittleren U-Wert der Gebäudehülle), so ergibt sich immer noch eine typische Transmissions- und Lüftungswärmelast um 3 W/m². Kommen innere Lasten von 3.5 W/m² hinzu (vgl. Kapitel 0), so beträgt die „wegzukühlende“ fühlbare Wärme 6.5 W/m².

Für den Sommerfall kann man von einer etwas höheren hygienschen Frischluftleistung ausgehen: In [AkkP 31] wird gezeigt, dass 42.5 m³/h/Person ohne besonderen Aufwand realisierbar und vertretbar sind. Diese Luft kann mit 17 °C in den Aufenthaltsbereich gebracht werden (unter Beachtung des Tauwasserschutzes bei den Zuluftkanälen). Bei 24 °C Raumtemperatursollwert ist die je Person in den Raum eingebrachte fühlbare Kühlleistung

$$42.5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{Person} \cdot 0.33 \text{ Wh}/(\text{m}^3\text{K}) \cdot (24 - 17) \text{ K} = 98.2 \text{ W}/\text{Person},$$

$$\text{oder, wenn wie in einem Büroraum } 15 \text{ m}^2 \text{ Hauptnutzfläche je Person angesetzt wird} \\ 42.5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{Person} \cdot 0.33 \text{ Wh}/(\text{m}^3\text{K}) \cdot (24 - 17) \text{ K} / (15 \text{ m}^2/\text{Person}) = 6.55 \text{ W}/\text{m}^2.$$

Diese von einem Frischluftkühlsystem aufbringbare fühlbare Leistung passt gerade zu der oben ermittelten Kühllast eines hocheffizienten Gebäudes mit Passivhausstandard in einer „subtropischen“ Umgebung. Grundsätzlich kann ein solches System zusätzlich auch noch die zugeführte Frischluft entfeuchten – wobei weitere Kühenthalpieströme vom gleichen Luftstrom aufgenommen werden, ohne dass seine Temperatur weiter abgesenkt wird.

Das beschriebene Konzept führt zu einem extrem geringen Energieverbrauch für die Kühlung – selbst wenn die oben beispielhaft angesetzten subtropischen Bedingungen monatelang anhalten sollten. In einem solchen Fall beträgt die gesamte Jahreskühlarbeit etwa 33 kWh/(m²a), der bei Kältezahl 2.2 eines konventionellen Kompressors benötigte Strombedarf etwa 15 kWh/(m²a) und der Jahresprimärenergiebedarf für Kühlung etwa 37 kWh/(m²a).

Anmerkung 1: Allein die Stromeinsparung durch die in Kapitel 0 beschriebene Verbesserung der Effizienz der Bürogeräte ist bedeutend höher als der hier bestimmte Stromverbrauch für eine energieeffiziente Kühlung.

Anmerkung 2: Der Stromverbrauch auch bei Verwendung konventioneller Kompressoren ist so gering, dass er z.B. durch den von 0,18 m² Photovoltaikfläche je Quadratmeter Hauptnutzfläche regenerativ erzeugten Strom gedeckt werden kann. Eine vollsolare Klimatisierung wäre mit dieser Technik bei Verwendung der Dachflächen von bis zu fünfgeschossigen Bürogebäuden machbar. Natürlich würde die photovoltaische Stromerzeugung das Konzept wieder verteuern (um etwa 22 €/m² Hauptnutzfläche).

Anmerkung 3: In Mitteleuropa werden derart extreme sommerliche Klimaverhältnisse auf absehbare Zeit auch bei fortgesetztem Klimawandel nicht eintreten und schon gar nicht monatelang. Wie in [AkkP 31] von R. Pfluger zur Kompaktgerätekühlung dargestellt, ergeben sich selbst für den sommerlichen „Extremklimadatensatz“ des Deutschen Wetterdienstes in Frankfurt elektrische Verbrauchswerte für die Kühlung nach diesem Prinzip von wenigen (2 bis 4) kWh/(m²a).

Fazit: Die auftretenden Energiebedarfswerte einer (aktiven) Frischluftkühlung in einem ansonsten hocheffizienten Passivhaus sind, ähnlich wie schon die Heizwärmebedarfswerte, vernachlässigbar gering. Die dazugehörige Technik ist ausgesprochen einfach und kostengünstig zu realisieren – bei entsprechender Planung geht sie gar nicht oder nur wenig über die für den Heizlastfall erforderliche Technik hinaus (Kompaktgerät bzw. hydraulisches Nachheizregister, das im Sommer als Kühlregister verwendet wird). Mit dieser Technik ist aber, selbst unter als extrem anzusehenden klimatischen Bedingungen ein behagliches Raumklima auch im Sommer innerhalb von Komfortklasse A einhaltbar.

In gemäßigten Klimaten und mit sehr effizienten Geräteausstattungen sind in den meisten Fällen die in den Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Protokollbänden 15 und 22 beschriebenen Strategien zur passiven Sommerkühlung in Passivhäusern ausreichend, insbesondere die erhöhte Sommerlüftung. Liegen aber besondere Bedingungen vor, so bietet das Passivhauskonzept mit sehr geringem Aufwand die zusätzliche, sehr sparsame aktive Kühlmöglichkeit der Frischluftkühlung für den Sommer, die ausgezeichnete Behaglichkeitsbedingungen in den Räumen ermöglicht.

Literatur

- [AkkP 15] Feist, Wolfgang (Hrsg.): **Passivhaus Sommerfall**, Protokollband Nr. 15 Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser; Passivhaus Institut, 1. Auflage, Darmstadt 1999.
- [AkkP 22] Feist, Wolfgang (Hrsg.): **Lüftungsstrategien für den Sommer**, Protokollband Nr. 22 Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser; Passivhaus Institut, 1. Auflage, Darmstadt 2003.
- [AkkP 25] Feist, Wolfgang (Hrsg.): **Temperaturdifferenzierung in der Wohnung**, Protokollband Nr. 25 Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser; Passivhaus Institut, 1. Auflage, Darmstadt 2004.
- [AkkP 31] Feist, Wolfgang (Hrsg.): **Energieeffiziente Raumkühlung**, Protokollband Nr. 31 Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser; Passivhaus Institut, 1. Auflage, Darmstadt 2005
- [ASHRAE 55-2003] ASHRAE: **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**, THIRD PUBLIC REVIEW, MAY 2003.
- [DIN EN ISO 7730] DIN EN ISO 7730: **Gemäßigtes Umgebungsklima**, Beuth Verlag, Berlin 1987.
- [Fanger 1970] Fanger, P.O.: **Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering**, USA: New York 1972, © P.O. Fanger 1970.
- [geo 2005] Geo online: **Japan verbietet Krawatten – für die Umwelt**, Meldung vom 03.06.2005.

Kurzzusammenfassungen zu den Protokollbänden des Arbeitskreises und weiterführende Informationen finden sich unter www.passiv.de.