

DYNAMISCH-THERMISCHE SIMULATIONEN ALS EIN BAUSTEIN IN DER BEWERTUNG DER WAHREN ENERGIEEFFIZIENZ VON GEBÄUDEN

Andreas Ampenberger
 Institut für Gebäude und Energie, TU Graz, Österreich

KURZFASSUNG

Diese Studie bestimmt für unterschiedliche Planungsoptionen eines Zielbüros die wahre Energieeffizienz, definiert als das Verhältnis von erreichter Qualität des Innenraumkomforts zu aufgewendetem Energiebedarf (Cody B., 2008), mit der sog. BEEP-Methode (Building Energy and Environmental Performance).

Die Beurteilung des Innenraumkomforts wird erstmals umfassend durchgeführt, indem zwischen mechanisch und natürlich betriebenen Gebäuden differenziert wird, die Luftqualität berücksichtigt wird und ein einfacher Ansatz zur Tageslichtbewertung als Experiment zur Anwendung kommt.

Die Studie macht deutlich, daß sich vor allem die Komfortparameter bei Gebäuden, die zur Raumkonditionierung auch das Potential der Umgebung nutzen, in kurzen Zeitabständen stark ändern. Hier helfen dynamische Simulationen die Zustände exakt zu erfassen.

ABSTRACT

This study determines for different planning options for an office room the true energy efficiency, defined as the ratio of achieved indoor comfort to the expended energy demand.

The rating of indoor comfort here differentiates between mechanical and naturally operated buildings, considers air quality and uses a simple approach for evaluation of daylight performance.

The study shows that comfort parameter may change quickly in period of time, that is why dynamic simulation is the right instrument to capture these conditions.

EINLEITUNG

Zur Verbesserung der Gesamtennergieeffizienz von Gebäuden wird derzeit die europäische Richtlinie 2002/91/EG durch nationale Gesetze und Regelwerke umgesetzt und angewendet.

Der Begriff der Energieeffizienz bzw. deren Steigerung wird meist unscharf verwendet und gleichgesetzt mit Verbrauchsreduktion und hoher Wirksamkeit bei der Verbrauchsdeckung. In (Hauser G., 2008) wird festgestellt, daß es eigentlich um die Energiemenge geht, die benötigt ist, um eine gewünschte Nutzung sicherzustellen. Auch in der genannten EU-Richtlinie erfolgt keine exakte Begriffsdefinition. Es wird von einer Energiemenge gesprochen, die auch unter Berücksichtigung anderer Faktoren, wie dem Innenraumklima, zu berechnen ist (EU-Richtlinie 2002/91/EG).

Cody schlägt in (Cody B., 2008) vor, die Energieeffizienz für Gebäude ähnlich einem technischen Effizienzindikator als Quotient von Nutzen zu Aufwand zu definieren. Hieraus entsteht der sog. BEEP-Wert (Building Energy and Environmental Performance), der die erreichte Qualität des Raumklimas mit dem hierfür notwendigen Energieaufwand in Beziehung setzt. Damit unterscheidet sich diese Methode grundlegend von üblichen Methoden (z. B. nach EAVG oder EnEV), die von einem als Randbedingung definierten Raumklima ausgehen und bei dem daraus resultierenden Nutzenergiebedarf eine Effizienzbetrachtung der Anlagentechnik und der Energiebereitstellung durchführen.

Aufgrund der dynamischen Wechselwirkungen im Raum, des zeitlich variablen Umgebungsklimas und der zunehmenden Zahl von Energiekonzepten, die mit der Umgebung als Quelle für Heizen, Kühlen und Belüften interagieren, kann nicht davon ausgegangen werden, daß die angestrebten Sollwerte im Raum immer erreicht werden. Deshalb muß man für eine umfassende Gebäudebeurteilung jederzeit genau wissen, welcher Grad des Raumkomforts bei welcher Option und mit welchem Energieeinsatz erreicht wird.

Das genannte Bewertungsverfahren BEEP zur Bestimmung der wahren Energieeffizienz soll hier vorgestellt und an einer Planungsstudie angewendet werden. Durch den umfassenden Ansatz ist es geeignet, begleitend während der Planung Gebäudeoptionen/-varianten in einem ausreichenden Detaillierungsgrad bezüglich ihrer Energieeffizienz zu untersuchen.

METHODE

Die Energieeffizienz eines Gebäudes soll als das Verhältnis zwischen der Qualität des Raumklimas und der Quantität des notwendigen Energiebedarfs, um dieses Raumklima aufrecht zu halten, verstanden werden und wird durch die BEEP-Methode bestimmt (Cody B., 2008).

Die Qualität des Raumklimas wird durch die Anzahl der Nutzungsstunden (bzw. deren Prozentsatz N an der Nutzungszeit) mit unzureichender Behaglichkeit bestimmt. Für den aufgewendeten Energiebedarf werden Betriebsenergien (Primärenergie PED) bilanziert. Die Betriebsenergien werden durch eine dynamisch-thermische Simulation ermittelt, wobei die Verbraucher Wärme, Kälte, Beleuchtung und Luftförderung als Nutzenergien berücksichtigt werden. Die Umrechnung auf Endenergie erfolgt hier vereinfacht über einen Faktor (15%), die Umrechnung auf Primärenergie für Wärme über den Faktor 1.14, für EU-Netzstrom über den Faktor 2.35.

Der BEEP-Wert als Kennwert der Energieeffizienz wird wie folgt bestimmt:

$$BEEP = \frac{NOH(100 - N)}{100PED}$$

BEEP	Building Energy and Environmental Performance (Einheit: Anzahl der Stunden mit akzeptabler Behaglichkeit je kWh/m ² a)
NOH	Anzahl der Stunden im Jahr, bei denen das Büro belegt ist (hier: 2610h)
PED	Primärenergiebedarf (Heizung, Kühlung, Beleuchtung, Luftförderung) (kWh/m ² a)
N	Prozentsatz der Arbeitsstunden mit unzureichender Behaglichkeit (PPD > 10%)

Der Begriff des behaglichen Raumklimas soll den thermischen Komfort, die Luftqualität und auch den visuellen Komfort umfassen.

Thermischer Komfort

Als Kriterium für den thermischen Komfort wird der von Fanger (Fanger, P.O., 1970) definierte PMV-/PPD-Index herangezogen, der auch in das Normenwerk (ÖNORM EN ISO 7730, 2006) aufgenommen wurde. Der PPD-Index gibt an, wieviel Prozent der Personen in der thermischen Umgebung voraussichtlich unzufrieden sein werden. In der ISO 7730 wird ein PPD-Wert von kleiner 10% empfohlen, so daß für den BEEP-Wert die Anzahl der unbehaglichen Nutzungsstunden mit der Kondition $PPD > 10\%$ ermittelt wird.

Ein Kritikpunkt an Fangers anerkanntem Behaglichkeitsmodell ist der Umstand, daß es durch Versuchsreihen mit Personen entstand, die keinen Einfluß auf das Raumklima nehmen konnten und nach dem Behaglichkeitsempfinden, nicht aber nach ihrer Zufriedenheit befragt wurden. Aktuelle Forschungsergebnisse (deDear R. et al., 1998) zeigen zudem, daß bei Nutzerbefragungen im Zusammenhang mit frei belüfteten Gebäuden größere Abweichungen zu Vorhersagen mit dem herkömmlichen PMV-/PPD-Modell auftreten. Die Nutzer dieses Gebäudetypus tolerieren offenbar ein breiteres Spektrum der operativen Raumtemperatur als Nutzer von klimatisierten Gebäuden (Hellwig R., 2005). Die Unterschiede werden mit der Möglichkeit einer größeren persönlichen Einflußnahme und einer geringeren Erwartungshaltung für das Raumklima erklärt.

Auf die genannten Untersuchungen hin erweiterte Fanger (Fanger P.O. et al., 2002) das PMV-/PPD-Modell um einen Anpassungsfaktor, dem expectancy-Faktor, der berücksichtigen soll, daß in warmen Klimazonen lebende Personen mit niedrigen Erwartungen an ihre thermische Umgebung höhere Temperaturen als akzeptabel hinnehmen. Die Erwartungshaltung ist um so geringer, je weniger üblich klimatisierte Gebäude in dieser Klimazone sind. Fanger stellt anhand einer weniger ausgewählter Orte die Bandbreite der Faktoren zwischen 0.5 und 1 vor und erklärt Forschungsbedarf für eine genaue ortssabhängige Bestimmung der Faktoren. In der BEEP-Bewertung werden Gebäude mit keiner oder geringer Klimatisierung mit dem Expectancy-Faktor bewertet. Lt. Fanger sollte er sich für Regionen mit einigen wenigen klimatisierten Gebäuden und warmer Sommersaison, wie dem hier angenommenen Standort München, in einem Bereich von 0.7 bis 0.9 bewegen.

Luftqualität

Die Luftqualität wird als unzureichend bewertet, sobald der sog. Pettenkofer-Wert 1000ppm überschreitet.

Visueller Komfort

Der visuelle Komfort, speziell die Tageslichtsituation, hat einen wichtigen Stellenwert. Elke Gossauer (Gossauer E., 2008) zeigt aus einer Feldstudie mit 17 Bürogebäuden, daß die Bedeutung von Tageslicht bei einer Nutzerumfrage in Bezug auf die eingeschätzte Wichtigkeit in der Nähe der thermischen Faktoren angesiedelt wird und zudem bisher eher unzufriedene Zustände empfunden werden (vgl. Abbildung 1).

Visueller Komfort sollte auch nicht isoliert vom thermischen Komfort betrachtet werden, da er wesentlich von Elementen, wie z.B. Sonnenschutz-einrichtungen, beeinflusst wird, die für die Regulierung des thermischen Komforts vorgesehen werden.

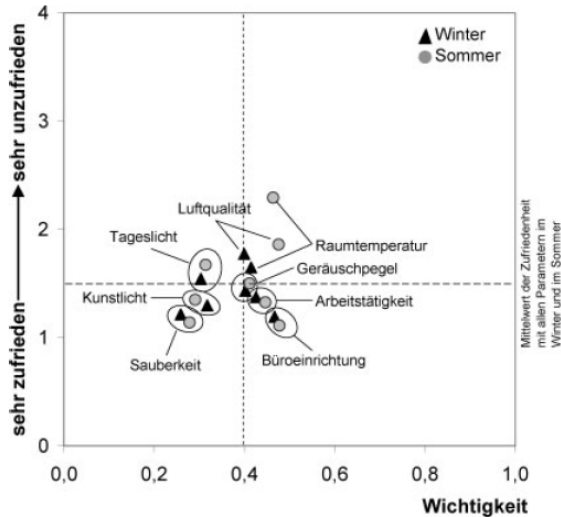


Abbildung 1: Handlungsrelevanzmatrix aus (Gossauer E., 2008)

Die Integration einer geeigneten Bewertung in BEEP wird zur Zeit intensiv untersucht, gestaltet sich aber schwierig, da viele Faktoren zum visuellen Komfort beitragen und bisher keine umfassende quantitative Beurteilungsmöglichkeit für unbehagliche Zustände existiert.

Besonders wichtig erscheint die Ermittlung und Bewertung von Blendungssituationen und die Behandlung der Fragestellung, inwieweit ein zu geringer Tageslichtanteil an der Raumbeleuchtung zu Diskomfort führen kann. Hier gibt es Hinweise aus der Literatur, daß Nutzer Tageslicht gegenüber Kunstlicht als hochwertiger einschätzen und die Bewältigung von Arbeit streßfreier und angenehmer erfolgt (Galasiu, A. et al., 2006) (Heerwagen, J.H., 1986).

Innerhalb dieser Untersuchungsreihe soll betrachtet werden, wie sich die Anwendung der sog. Useful Daylight Illuminance (Mardaljevic et al.) innerhalb der BEEP-Bewertung auswirkt. Mardaljevic definiert Intensitätsbereiche von Momentanbeleuchtungsstärken im Raum, die erstrebenswert sind und als „gutes“ Tageslicht bezeichnet werden können. Es ist dies der Bereich am Arbeitsplatz mit einer Beleuchtungsstärke E ab 50 lux bis 250 lux. Mardaljevic stellt fest, daß generell Tageslicht mit $E < 50$ lux, gleichgültig ob als alleinige Quelle oder ergänzt durch Kunstlicht „ungenügend“ ist. Ab 250 lux besteht ein erhöhtes Risiko auf potentielle Blendung (Mardaljevic J et al., 2006).

Für diese Studie wird angenommen, daß an teilige Tageslichtbeleuchtungsstärken $E < 50$ lux (auch bei Ergänzung durch Kunstlicht) und größer 2500 lux potentiell Diskomfort hervorrufen können.

SIMULATIONSSTUDIE UND ZIELE

Es ist der Anspruch von BEEP durch seine Gesamtenergieeffizienzbewertung - mit den beiden verknüpften Kernindikatoren Energiebedarf und Komfort - eine gute umfassende Planungsunterstützung zu bieten, indem Planungsvarianten - im folgenden für ein Zellenbüro - hinsichtlich ihrer Effizienz im BEEP-Diagramm direkt verglichen werden können.

Zunächst wird ein Ausgangsfall definiert, der durchaus üblich ist und ein konservatives Energie- und Klimakonzept aufweist. Es ist eine umfassende TGA mit RLT-Anlage und Kühldecke vorhanden, welche vermutlich in der Lage sein wird, ein konstantes und gutes Innenraumklima herzustellen, wobei der Energiebedarf aufgrund moderner Anlagentechnik akzeptabel sein wird.

Ausgehend von diesem Ausgangsfall sollen zwei Untersuchungsreihen zu Planungsoptionen hinsichtlich Lüftung und Raumkonditionierung (Untersuchungsreihe [L]) sowie hinsichtlich Tageslichtperformance (Untersuchungsreihe [T]) die Notwendigkeit eines Bewertungsverfahrens wie BEEP zeigen, das durch eine umfassende, integrierte und zeitlich hochauflösende Komfort- und Effizienzbewertung in der Lage ist, „sanft“e“ Konditionierungskonzepte mit einem variablen Innenraumklima zu beurteilen.

Ausgangsfall

Die Geometrie des betrachteten Zellenbüros mit Standort München bleibt für alle Varianten unverändert und ist in Abbildung 2 dargestellt. Es handelt sich um einen 3-achsigen südorientierten Büroraum für 3 Personen mit einem Achsenmaß von 1.35m, einer Raumbreite von 4.05m, einer Raumtiefe von 6.5m und einer lichten Höhe von 3m.

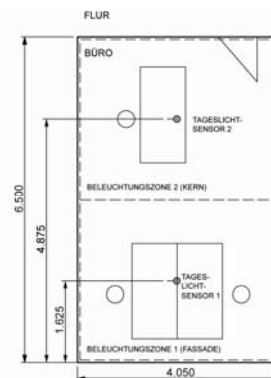


Abbildung 2: Betrachtetes 3-achsiges Zellenbüro

Tabelle 1: Daten der Fassade, Ausgangsfall

opak	
u_{opak} [W/m ² K]	0.1
Fenster, nicht öffenbar	
u_F [W/m ² K]	0.6
g [-]	0.55
T_L [-]	0.72
Sonnenschutz	
zweigeteilt, Lichtlenkung im oberen Drittel	
Aktivierung bei [W/m ²]	200
Transmission oben [-]	0.41
Transmission unten [-]	0.11
Infiltration	
LW [1/h]	0.05

Das Büro soll für den Ausgangsfall eine hochwärmegedämmte Fassade in Holzkastenbauweise mit hoher Dichtheit erhalten und zudem einen auch bei hohen Winddrücken zuverlässig funktionierenden Sonnenschutz. Aus diesen Gründen wird der transparente Teil der Fassade mit einer 3-Scheiben-WSV-Verglasung, vorgesetzter Prallscheibe und einem zwischenliegenden Lamellen-Sonnenschutz ausgeführt. Auch der Fensteranteil der Fassade sollte aus Gründen des Wärmeschutzes nicht zu hoch sein, er betrachtet von innen betrachtet 50% (vgl. Tabelle 1).

Die Belüftung erfolgt kontrolliert über eine RLT-Anlage, so daß die Fenster als nicht öffenbar ausgeführt werden. Diese wird mit dem hygienisch notwendigen, konstanten 1.3fachen Luftwechsel betrieben und ist mit einer Wärmerückgewinnung (Rückwärmezahl 0.7) ausgestattet. Da die Raumkühlung über eine Kühldecke erfolgt, wird der Zuluftvolumenstrom auf einen Wassergehalt von 10g/kg tr. Luft entfeuchtet. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die eingesetzte TGA zur Raumkonditionierung.

Tabelle 2: TGA zur Raumkonditionierung

RLT-Anlage	
LW [1/h]	1.3
Rückwärmezahl [-]	0.7
Specific fan power [W/(l/s)]	2.4
Entfeuchtung [g/kg tr.L.]	8
Zulufttemperatur [°C]	20
Raumkühlung (Kühldecke)	
Sollwert [°C]	gleitend bis 26
Verfügbare Leistung [W/m ²]	50W/m ²
Raumheizung (Radiatoren)	
Sollwert [°C]	20 (abgesenkt 17)
Verfügbare Leistung [W/m ²]	70

Planungsvarianten Belüftung (Untersuchungsreihe [L])

In einer ersten Untersuchungsreihe [L] werden unterschiedliche Konzepte zur Lüftung und Konditionierung des Raumes untersucht. Diese Konzepte versuchen in unterschiedlichem Maß eine direkte Fensterlüftung zu nutzen. Die Effektivität des Konzeptes in Bezug auf Erreichen eines gewünschten Raumklimas ist deshalb unmittelbar an die klimatischen Bedingungen des Ortes gekoppelt. Für alle Varianten ist damit von Interesse, inwieweit ein angestrebter Raumluftzustand mit welchem Energiebedarf erreicht werden kann. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die Varianten.

Tabelle 3: Überblick über die Planungsvarianten Belüftung

A	Fenster nicht öffenbar RLT Anlage mit mechanischem LW Kühldecke
L1	Fenster potentiell öffenbar RLT Anlage mit mechanischem LW Kühldecke mit Taupunktüberwachung
L2	Mixed-Mode-Lüftung Kühldecke mit Taupunktüberwachung
L3	Reine Fensterlüftung Kühldecke mit Taupunktüberwachung
L4	Reine Fensterlüftung Keine aktive Kühlung Nachtlüftung

Variante [L1] sieht gegenüber dem Ausgangsfall öffenbare Fenster vor, die jedoch nicht effektiv in das Lüftungskonzept eingebunden sind, d.h. die RLT-Anlage versorgt den Raum weiterhin konstant mit dem hygienischen Luftwechsel. Es ist nun eine zusätzlich Taupunktüberwachung für die Kühldecke notwendig. Eine zeitweise erzwungene Leistungsreduktion der Kühldecke könnte Auswirkungen auf den thermischen Komfort, Energiebedarf und die Effizienz haben.

Variante [L2] implementiert ein Mixed-Mode-Lüftungskonzept. Bei Außentemperaturen zwischen 5°C und 20°C sind die Nutzer selbst verantwortlich, über Fenster den nötigen Luftwechsel herbeizuführen. Die RLT-Anlage kann zu diesen Zeiten abgeschaltet werden, um Energie für Luftförderung einzusparen. Da versucht werden soll, auch den Einfluß einer unregelmäßigen Fensterlüftung auf die Behaglichkeit zu untersuchen, wird diese über ein integriertes Zonenlüftungsmodell abgebildet. Das Zeitprofil für das Lüftungsverhalten – angewendet auf 40% der zur Verfügung stehenden Fensterfläche – wurde in Anlehnung an die Arbeiten von (Iftikhar A., 2001) entwickelt und berücksichtigt eine zu beobachtende Außentemperaturabhängigkeit bei der Lüftungsintensität (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Zeitprofile für Fensterlüftung

Stündliche Öffnungsdauer			
$t_{\text{außen}} < 0^\circ\text{C}$	$0^\circ\text{C} < t_{\text{außen}} < 14^\circ\text{C}$	$14^\circ\text{C} < t_{\text{außen}} < 18^\circ\text{C}$	$t_{\text{außen}} > 18^\circ\text{C}$
1/12h	2/12h	5/12h	9/12h
Resultierender mittlerer Luftwechsel			
Winter	Frühjahr S	ommer	Herbst
1.9 [1/h]	3.1 [1/h]	3.5 [1/h]	2.5 [1/h]

Während der übrigen Zeit sorgt die RLT-Anlage mit einer Wärmerückgewinnung für den nötigen Luftwechsel. Eine Kühldecke ist weiterhin vorhanden.

Variante [L3] konditioniert über natürlichen Luftwechsel und eine Kühldecke, während Variante [L4] auch auf eine aktive Kühlung verzichtet und stattdessen über gesteuerte Fenster in der Nacht lüftet und kühlt.

Planungsvarianten Tageslicht (Untersuchungsreihe [T])

Der Ausgangsfall besitzt lediglich eine Fensterfläche von 50% bzw. eine transparente Glasfläche von 35%. Eine ungünstige Tageslichtperformance sowie ein hoher Kunstlichtbedarf ist zu erwarten. Aus diesem Grund wurden zwei weitere Optimierungsansätze untersucht:

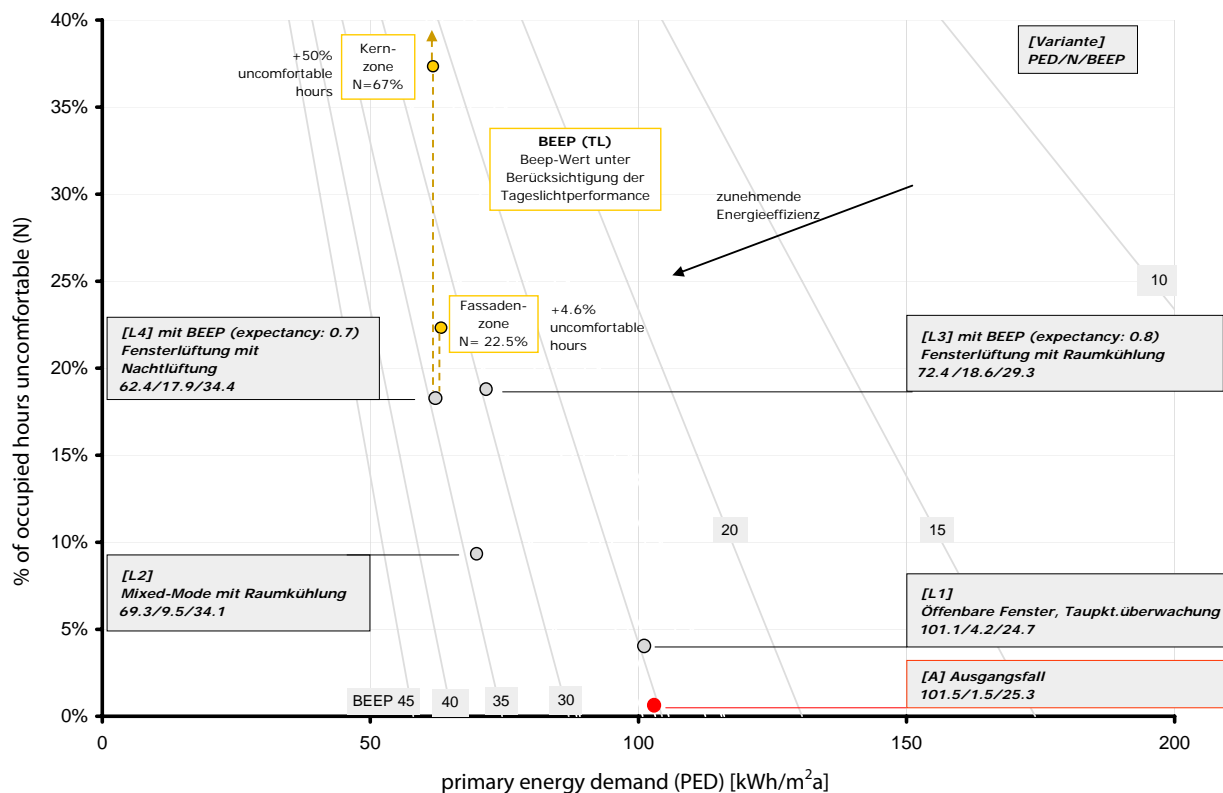
In Variante [T1] wird die innenseitige 3Scheiben-WSV-Verglasung durch eine 2Scheiben-WSV-Verglasung mit den Kennwerten 1/0.62/0.8 ($u/g/T_L$) ersetzt. Der Fensteranteil wird von 50% auf 70% erhöht, es wird ein transparenter Glasanteil von 60% erreicht.

Variante [T2] verzichtet auf eine Kastenfensterlösung und nutzt eine einschichtige Sonnenschutzverglasung ohne zusätzlichen Sonnenschutz mit den Kennwerten 1.1/0.37/0.70 ($u/g/T_L$). Der einschichtige Aufbau ohne Prallscheibe wird durch den Wegfall des Sonnenschutzes ermöglicht. Wie in Variante [T1] wird der Fensteranteil von 50% auf 70% erhöht.

ERGEBNISSE

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse für den Primärenergiebedarf der Untersuchungsreihe [L] (Lüftung) und [T] (Tageslicht). Dies sind im wesentlichen die Informationen, die man durch die Bewertung nach EAVG/EnEV erhält.

Der Energiebedarf von Variante [L1] bis [L4] nimmt (mit Ausnahme von Variante [L3]) kontinuierlich ab. Dies ist eine Folge der Nutzung des direkten, freien Kühlpotentials über Fensterlüftung und der


Abbildung 3: BEEP-Diagramm für die Untersuchungsreihe [L] (Lüftung)

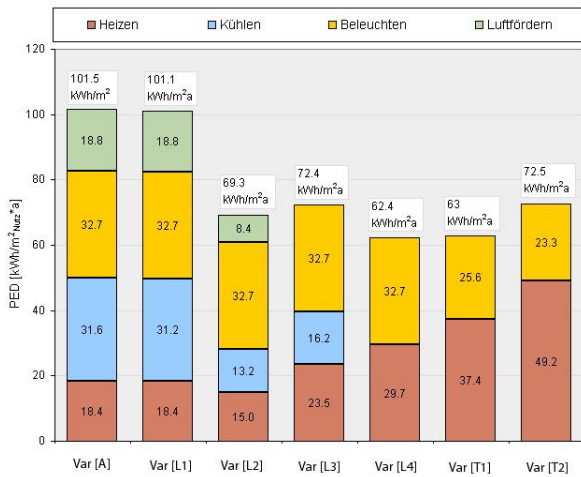


Abbildung 4: Primärenergiebedarf für die Untersuchungsreihen

Reduktion des Energiebedarfs für Lufttransport, auch wenn gleichzeitig der Wärmebedarf durch die fehlende Möglichkeit einer Wärmerückgewinnung steigt. Auffällig ist auch der hohe Bedarf an Kunstlicht.

Obwohl nun der Energiebedarf bekannt ist, kann man keine Aussage zu dem tatsächlich erreichten Komfort sowie keine Aussage zur Energieeffizienz, dem Verhältnis von Energiebedarf zu Komfort treffen. Dies ist mit Hilfe des BEEP-Diagramms möglich. Es spannt mit dem Primärenergiebedarf auf der x-Achse und den Prozentsatz unbehaglicher Stunden auf der y-Achse ein Feld auf, in dem die Zustandspunkte der einzelnen Varianten eingetragen werden (vgl. Abbildung 3). Punkte gleicher Energieeffizienz sind durch die sog. BEEP-Linien miteinander verbunden. Die Energieeffizienz nimmt mit steigendem BEEP-Wert von rechts nach links zu.

Bis auf Variante [L4], die ein frei betriebenes Konzept verfolgt, verwenden alle Varianten denselben Sollwert für Kühlung und Heizung. Dennoch erreichen sie aus den folgenden Gründen eine unterschiedliche Qualität des Raumklimas (vgl. auch Tabelle 3, Aufgliederung der unbehaglichen ppd-Werte in die Ursachen):

[L1] Aufgrund der potentiell öffnbaren Fenster, muß die Vorlauftemperatur der Kühldecke bei Tauwassergefahr reduziert werden. Dies führt zu Überhitzungszuständen und einem Komfortverlust an rd. 4% der Nutzungsstunden.

[L2] Im Mixed-Mode-Betrieb werden die kritischen Stunden der Tauwassergefahr reduziert, da sie meist in der Periode der RLT-Anlagen-Nutzung liegen. Zu diesem Zeitpunkt bleiben die Fenster geschlossen und es muß keine Leistungsreduktion der Kühldecke erfolgen. Allerdings findet nun während der Periode der Fensterlüftung ein intensiverer Luftwechsel statt,

da der notwendige Luftwechsel nun ausschließlich über die Fenster bereitgestellt werden muß. Es kommt häufiger zu kurzzeitig zu kalten oder zu warmen und damit unbehaglichen Raumluftzuständen. An 140 zusätzlich unbehaglichen Stunden wird außerdem die geforderte Luftqualität mit einem CO₂-Gehalt von maximal 1000ppm nicht erreicht.

[L3] Diese Variante mit Fensterlüftung und Raumkühlung wird als frei belüftetes Gebäude mit dem modifizierten PMV-/PPD-Expectancy-Index bewertet. Obwohl Fanger keine Abhängigkeit des Faktors vom Grad der masschinellen Klimatisierung definiert, erscheint es sinnvoll dies in die Bewertung mit einzubeziehen. Anstelle des für die Klimazone maximal möglichen Faktors von 0.7 wird aufgrund der vorhandenen masschinellen Raumkühlung lediglich ein Reduktionsfaktor von 0.8 verwendet. Dies bewirkt eine Reduktion der „herkömmlichen“ ppd-Stunden um 53%.

Tabelle 5: Aufgliederung der unbehaglichen ppd-Werte in die Ursachen

	ppd-Stunden thermisch	ppd-Stunden Taupunkt	ppd-Stunden CO ₂	ppd-Stunden Licht Fassade		ppd-Stunden Licht Kern	
				Blendung	zu wenig Tageslicht	Blendung	zu wenig Tageslicht
VAR [A]	39	-	0	73	10	13	1380
VAR [L1]	39	70	0	73	10	13	1380
VAR [L2]	93	14	140	73	10	13	1380
VAR [L3]	60 (exp)	137	290	73	10	13	1380
VAR [L4]	183 (exp)	-	283	73	10	13	1380
VAR [T1]	294 (exp)	-	151	250	0	25	498
VAR [T2]	484 (exp)	-	0	1032	0	70	298

Bei Fensterlüftung mit Nachtlüftung ohne aktive Kühlung [L4] wird eine höhere Zahl thermisch unbehaglicher Stunden erreicht. Da allerdings keine Taupunktüberwachung erfolgt, verbessert sich die Behaglichkeit gegenüber Variante [L3] sogar geringfügig.

Betrachtet man nicht nur den Komfort, sondern die Energieeffizienz, so wird aus dem BEEP-Diagramm ersichtlich, daß beide Varianten mit natürlicher Lüftung energieeffizienter sind als die Ausgangsvariante mit hohem Klimatisierungsgrad. Allerdings ist zu bedenken, daß für diese Varianten an rund 18% der Nutzungszeit unbehagliche Zustände herrschen. Überraschend ist auch, daß die Low-Tech-Variante (abgesehen von der Notwendigkeit stuerbarer Fenster) geringfügig besser abschneidet als das Mixed-Mode-Konzept.

Gesondert soll die Auswirkung der Beurteilung der Tageslichtsituation durch Integration der Schwellwerte für die Raumbeleuchtungsstärke nach dem UDI-Index in den sog. BEEP (TL)-Index gezeigt werden (vgl. Tabelle 5 und Abbildung 3, orange Punkte). Es erscheint eine Unterteilung in

Raumzonen sind voll, sobald diese sich stark in der Tageslichtperformance unterscheiden. In diesem Fall wird eine Teilung in eine fassadennahe Zone mit 2 Arbeitsplätzen und eine kernnahe Zone mit einem Arbeitsplatz vorgenommen. Für die fassadennahen Arbeitsplätze werden 73 potentiell unbehagliche Stunden durch Blendung ($E > 2500 \text{ lux}$) und 10 Stunden mit zu wenig Tageslicht ($E < 50 \text{ lux}$, an Nutzungsstunden mit Tageshelligkeit) bestimmt. Für die kernnahe Zone sind es 1380h mit $E < 50 \text{ lux}$. Für das BEEP-Diagramm bedeutet dies die Verschiebung der Zustandspunkte entlang der y-Achsen-Richtung hin zu einem Anteil von 22.5% für den Fassadenbereich bzw. 67% unbehaglicher Nutzungsstunden für den Kernbereich.

Die Untersuchungsreihe [T] soll nun Erkenntnisse bringen, wie eine veränderte Tageslichtsituation durch BEEP (TL) bewertet wird (vgl. Abbildung 5). Für Fall [T1] zeigt sich aufgrund des größeren Fensteranteils und der verbesserten Lichttransmission für den Fassadenbereich, daß nun mehr keine Stunden mit einem Tageslichtanteil $< 50 \text{ lux}$ auftreten, dafür jedoch eine hohe Zahl an Stunden mit potentieller Blendungsgefahr. Der Sonnenschutz wird nicht als Blendenschutz betrieben wird. Insgesamt wird so eine höhere Zahl unbehaglicher Stunden erreicht. Dies legt nahe, daß in der Simulation auch ein (nutzerbetriebener) Blendenschutz betrachtet werden muß und dabei überprüft werden muß, ob er die Beleuchtungsstärke unter den kritischen Schwellwert

von 2500 lux senkt. In weiteren Untersuchungen ist auch zu prüfen, ob dieser Schwellwert geeignet ist, um das Phänomen Blendung zu beurteilen. Für den kernnahen Bereich werden die unbehaglichen Stunden aufgrund des zu geringen Tageslichtanteils stark auf ca. ein Drittel gesenkt. Trotz optimierter Fassade verbleiben für diese tief liegende Zone noch immer 498 Stunden unbehagliche Stunden.

Für den Fall [T3], der ein Sonnenschutzglas ohne Sonnen- und Blendschutz vorsieht, ergeben sich über 1000 unbehagliche Stunden aufgrund Gefahr von Blendung in der Fassadenzone und auch in der Kernzone bereits ein Anteil von 70 Stunden.

DISKUSSION UND AUSBLICK

Die BEEP-Methode ist sehr gut geeignet, die wahre Energieeffizienz als Verhältnis von Nutzen (Raumklima) zu Aufwand (Energieeinsatz) zu bestimmen. Die gezeigten Planungsvarianten haben deutlich gemacht, daß je nach Klima- und Energiekonzept ein deutlich unterschiedliches Raumklima erreicht wird. Nur durch den Bezug des eingesetzten Energiebedarfs auf das erreichte Klima kann gesagt werden, ob es sich um ein energieeffizientes Gebäude handelt oder nicht.

Die BEEP-Methode liefert gute Ergebnisse, wenn das thermische Raumklima und die Luftqualität bewertet werden. Wie gezeigt wurde, ist eine

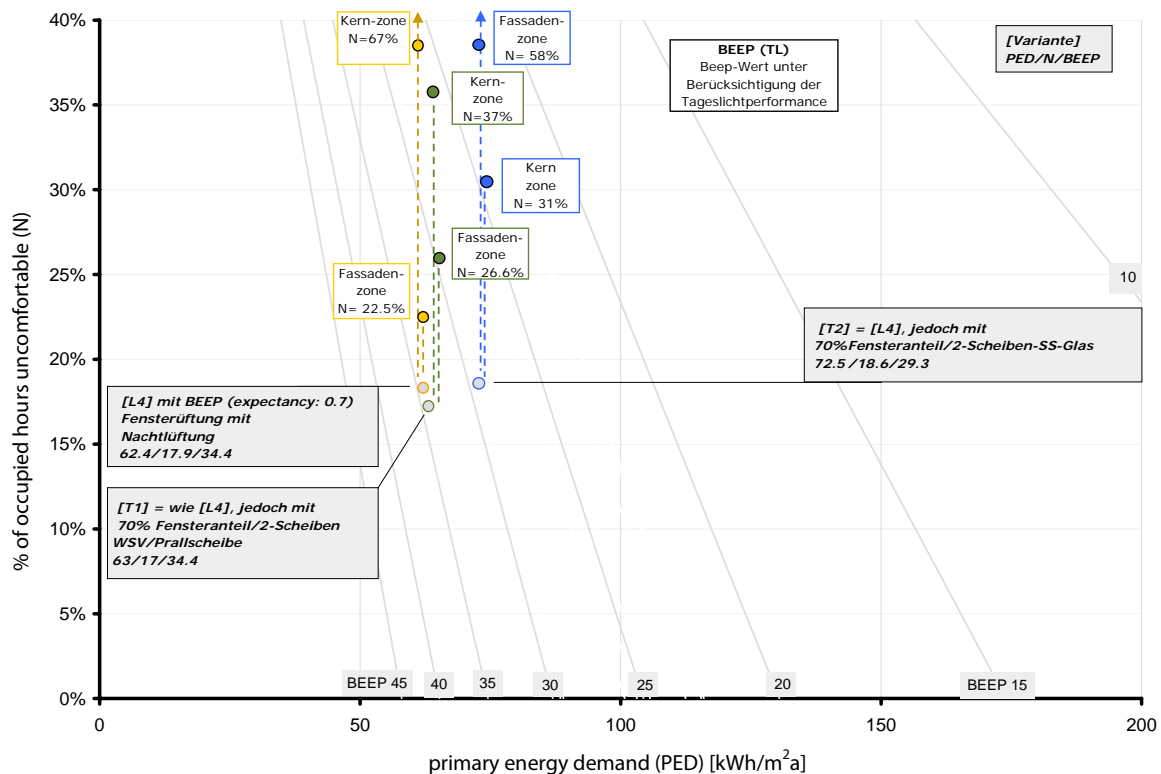


Abbildung 5: BEEP-Diagramm für die Untersuchungsreihe [T] (Tageslicht)

hochauflösende Betrachtung der Dynamik vor allem bei der Bewertung des Raumkomforts nötig. Die Werte wurden auf Basis einer 10-Minuten-Auswertung gewonnen, Stundenwerte zeigen bereits zu geringe Aussagekraft.

Den zugrunde gelegten Nutzerprofilen kommt eine große Bedeutung zu. Sie müssen deshalb in der Zukunft noch näher spezifiziert werden, eventuell mit der Unterscheidung eines trägen und intensiven Nutzerverhaltens. Es ist auch zu klären, ob kurzzeitige, dynamische Überschreitungen genauso relevant für den Komfort sind wie längerfristige, so könnte z.B. die Fensterlüftung, die kurzzeitig zu kalte oder warme Raumluftzustände verursachen kann, auch als belebend gewertet werden.

Für frei belüftete und mit weitgehend natürlichen Konzepten betriebene Gebäude ist zu klären, ob die Bewertung mit dem durch einen expectancy-Faktor abgeänderten PMV-/PPD-Index die geeignete ist. Hier gibt es bereits mehrere weitere Ansätze, die zu überprüfen sind (DeDear R. et al., 1998). Dabei wäre es wünschenswert, wenn der Grad einer mechanischen Konditionierung berücksichtigt wird.

Die hier als Experiment eingesetzte Methode des UDI (Useful Daylight Illuminance) gibt zwar eine Information über einen Ausschnitt des visuellen Raumklimas, nämlich über Stunden mit wenig Tageslichtanteil <50lux und Stunden mit einem sehr hohen Anteil, der potentiell zu Blendung führen könnte. Ob bzw. welcher Anteil dieser Stunden wirklich als unbehaglich bezeichnet werden kann, muß noch geklärt werden. Eventuell ist neben dem „harten“ Indikator Unbehaglichkeit ein weiterer Index in die BEEB-Bewertung zu integrieren, der z.B. die Stunden einer UDI-Bewertung auf eine andere Art, wie z.B. als Stunden mit ungenügender Tageslichtperformance, beurteilt. Dann eben sollten weitere Gesichtspunkte des visuellen Komforts, wie die Möglichkeit eines Ausblicks oder die Gleichmäßigkeit einer Beleuchtung in Zukunft berücksichtigt werden.

LITERATUR

Cody B. 2008. Entwicklung einer Methode zum Vergleich der tatsächlichen Energieeffizienz von Gebäuden, in: HLH Bd. 59 (2008) Nr. 1

DeDear R. et al. 1998. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference, ASHRAE Transactions 1998, Vol. 104, Part 1

EU-Richtlinie 2002/91/EG. 2002. EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, erlassen vom europäischen Parlament und dem Rat der Europäischen Union

Fanger, P.O. 1970. Thermal Comfort. Analysis and applications in environmental engineering, Copenhagen

Fanger P.O. et al. 2002. Extension of the PMV-model to non-air-conditioned buildings in warm climates, Energy and Buildings 34, S.533-536

Galasiu, A. et al. 2006. Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylight offices: a literature review

Gossauer, E. 2006. Nutzerzufriedenheit und Komfort am Arbeitsplatz – Ergebnisse einer Feldstudie in Bürogebäuden, in: Bauphysik 30, Heft 6

Hauser G. 2008. Energieeffizientes Bauen – Umsetzungsstrategien und Perspektiven, in: Energieeffizientes und solares Bauen, Jahrestagung des Forschungsverbands Erneuerbare Energien, Berlin

Heerwagen J.H. et al. 1986. Lighting and psychological comfort, in: Lighting Design and Application 16 (4) S. 47-51

Hellwig R. 2005. Thermische Behaglichkeit. Unterschiede zwischen frei und mechanisch belüfteten Gebäuden aus Nutzersicht. Dissertation. München

Iftikhar A., 2001. Thermal comfort: use of controls in naturally ventilated buildings, in: Energy and Buildings 33, S.235 -244

Mardaljevic et al. Climate-Based Daylight Analysis For Residential Buildings, Internet-Dokument, Institute Of Energy And Sustainable Development

Mardaljevic J. 2006 et al. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors, Energy And Buildings (38) S. 905 - 913

ÖNORM EN ISO 7730. 2006. Ergonomie der thermischen Umgebung, Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit