

# Energieeffizienz in der Universität – das ZUB-Gebäude an der Uni Kassel

Dietrich Schmidt, Jan Kaiser, Anton Maas

## 1. Einleitung

Der vorliegende Beitrag stellt einen Bericht über die Ergebnisse des Teilprogramms Energetische Optimierung, Vermessung und Dokumentation für das Demonstrationsgebäude des Zentrums für Umweltbewusstes Bauen im Rahmen des Förderprogramms Energieoptimiertes Bauen, Teilkonzept 3, Solar optimierte Gebäude mit minimalen Energiebedarf dar, welches von Oktober 1999 bis Mai 2004 von den Fachgebieten Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung der Universität Kassel bearbeitet wurde.

Ziel des Vorhabens war es, zu zeigen, dass durch integriertes Planen und das Umsetzen umweltbewusster Strategien und Konzepte Gebäude erstellt werden können, die sowohl einen minimalen Energiebedarf aufweisen, als auch einen maximalen Komfort für den Nutzer bieten. Das Demonstrationsgebäude Zentrum für Umweltbewusstes Bauen in Kassel wurde über zwei Jahre vermessen und hinsichtlich oben genannter Aspekte evaluiert.

Im Hinblick auf die energetische Qualität der geförderten Vorhaben werden folgende Anforderungen bezüglich des Primär/- und Endenergiebedarfs für Heizung, Haustechnik und Beleuchtung definiert:

Primärenergiebedarf  $\leq 100 \text{ kWh/m}_a$

Endenergiebedarf  $\leq 70 \text{ kWh/ m}_a$

Nutzenergie Heizung  $\leq 40 \text{ kWh/ m}_a$

## 2. Gebäudebeschreibung

Der über ein Erschließungsatrium unmittelbar an den Altbau eines bestehenden Universitätsgebäudes angegliederte einhüftige, dreigeschossige Neubau des „Zentrum für Umweltbewusstes Bauen“ zeichnet sich durch folgende konstruktive und technische Besonderheiten aus, die einen Beitrag zum energiesparenden Bauen leisten sollen:

- Ausrichtung der Hauptfassade nach Süden, mit einem Fensterflächenanteil von 100 %
- Niedrigst-Energiebauweise mit hohem baulichem Wärmeschutz (mittl. U-Wert aller Außenbauteile= 0,32 W/ m\_K)
- Thermisch aktivierte Bauteile zum Heizen und Kühlen
- Passive Kühlung durch Nutzung der Sohlplatte als Wärmetauscher
- Bedarfsgeführte mechanische Lüftung
- Natürliche Lüftung im Sommer sowie Nachtlüftung über das Erschließungsatrium
- Tageslicht/- und präsenzabhängige Kunstlichtversorgung

Die genannten Maßnahmen manifestieren sich in einem Heizwärmebedarf gemäß der bei Planungsstand gültigen Wärmeschutzverordnung von rd. 25 kWh/(m\_a). Der vorhandene Primärenergiebedarf gemäß Energieeinsparverordnung beträgt 4,16 kWh/(m\_a), welcher sich bei Bezug auf die beheizte Nettogeschossfläche (1347 m\_) zu 21,3 kWh/(m\_a) ergibt.

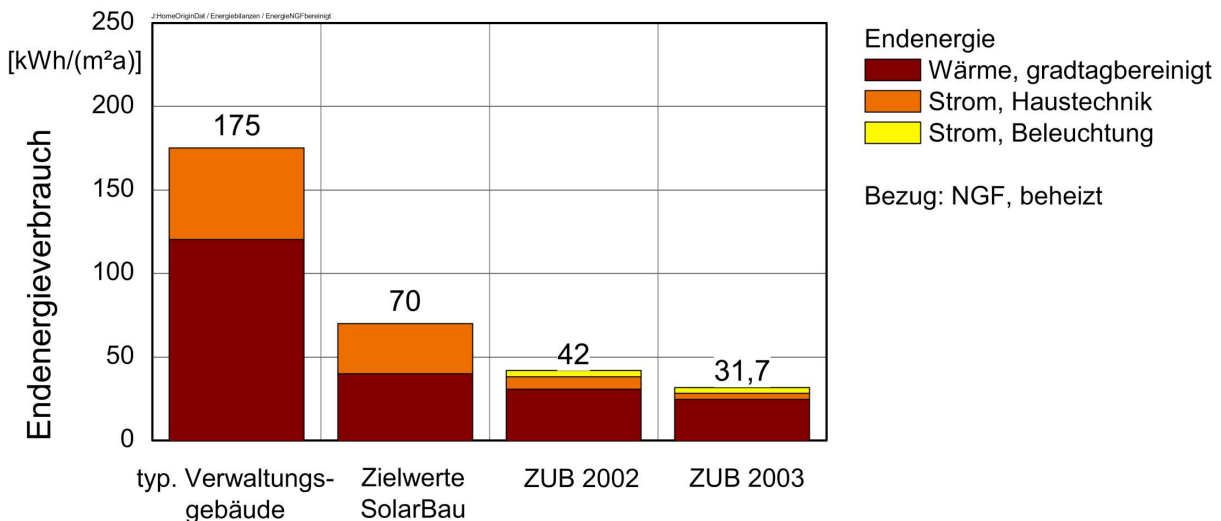
Die wesentlichen Erkenntnisse und Schlussfolgerungen aus dem Förderprogramm werden im Folgenden dargestellt.

### **3. Energieverbrauch**

In beiden Betriebsjahren des ZUB werden die Anforderungen weit übertroffen. Die bereinigten Endenergieverbräuche für die Beheizung des Gebäudes liegen mit 30,7 und 24,7 kWh/(m\_a) für die Jahre 2002 und 2003 dicht am berechneten Bedarf, aber weit unter den Vorgaben von SolarBau (Tabelle 1). Für das Jahr 2002 ergibt sich eine Minderung des Endenergieverbrauchs für Beheizung inklusive haustechnischer Anlagen gegenüber dem Zielwert SolarBau von 40% im Jahr 2002 und rund 55 % für 2003 (Bild 1). Der durchschnittliche Primärenergieverbrauch ist mit rd. 46 kWh/(m\_a) weniger als halb so hoch wie der Zielwert des Förderprogramms.

**Tabelle 1:** End- und Primärenergieverbrauch bzw. -bedarf.

	Endenergie kWh/(m <sup>2</sup> a)		Endenergie bereinigt kWh/(m <sup>2</sup> a)		Zielwert SolarBau kWh/(m <sup>2</sup> a)	Primär- energie kWh/(m <sup>2</sup> a)		Zielwert SolarBau kWh/(m <sup>2</sup> a)
	2002	2003	2002	2003	≤ 40	2002	2003	≤ 100
	Heizung	26,1	22,3	30,7		24,7	21,49	
Haustechnik	6,3	3,2	7,4	3,5	21,46	10,15		
Beleuchtung	3,9	3,5	3,9	3,5	11,31	10,15		
Summe	36,3	29,0	42,0	31,7	≤ 70	54,26	37,59	≤ 100

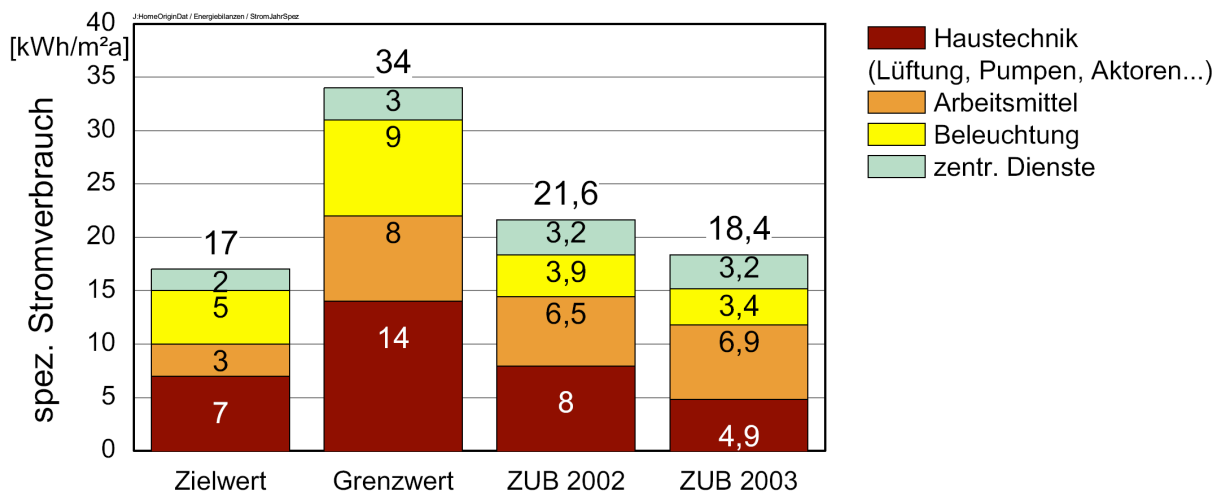


**Bild 1:** Spezifische Energieverbräuche für Heizwärme und elektrische Energie der haustechnischen Anlagen und Beleuchtung für die Jahre 2002 und 2003 im Vergleich zu Kennwerten typischer Verwaltungsgebäude und Zielwerten aus dem SolarBau-Programm.

## 4. Stromverbräuche

Der Stromverbrauch im Zentrum für Umweltbewusstes Bauen hat sich in den beiden Bilanzjahren als ungewöhnlich niedrig erwiesen. Im Jahresmittel wurde 2002 ein spezifischer Gesamtstromverbrauch von 21,6 kWh/(m<sub>a</sub>) gemessen, der sich im Jahr 2003 nochmals auf rund 18,4 kWh/(m<sub>a</sub>) verringerte. Der Vergleich mit Energiebedarfskennzahlen, welche beispielsweise der Schweizer Norm SIA 380 zu entnehmen sind, liefert für beide Betriebsjahre ein überaus positives Bild. Die Stromverbräuche liegen bereits

dicht am Zielwert der SIA von 17 kWh/ m\_a. In einigen Sektoren, wie Beleuchtung und technische Gebäudeausrüstung, werden die Zielwerte der genannten Norm sogar unterschritten (Bild 2). Es konnte mit der Evaluierung gezeigt werden, dass die umgesetzten Konzepte in ihrer Gesamtheit zu diesem guten Ergebnis beigetragen haben.



**Bild 2:** Vergleich der spezifischen Jahresstromverbräuche mit den Ziel und Grenzwerten in Anlehnung an die Schweizer Richtlinie SIA 380 für den Gebäudetyp 1.

## 5. Solaroptimierte Fassade

Die Ausrichtung der Hauptfassade nach Süden mit einem hohen Verglasungsanteil ( $U_w = 0,8 \text{ W/m}_K$ ,  $g = 0,42$ ) führt zu einer guten Ausnutzung der solaren Einträge. Es konnte gezeigt werden, dass sich die spezifische Heizleistung bei gleichen Außentemperaturen und hohen Einstrahlungen (tägl. Globalstrahlung  $\geq 90 \text{ W/m}_$ ) nahezu halbiert. Abmindernd wirkt sich dabei der außen liegende Sonnenschutz aus, welcher bei entsprechender Einstrahlung auf Grund von Blendungserscheinungen häufig genutzt wird.

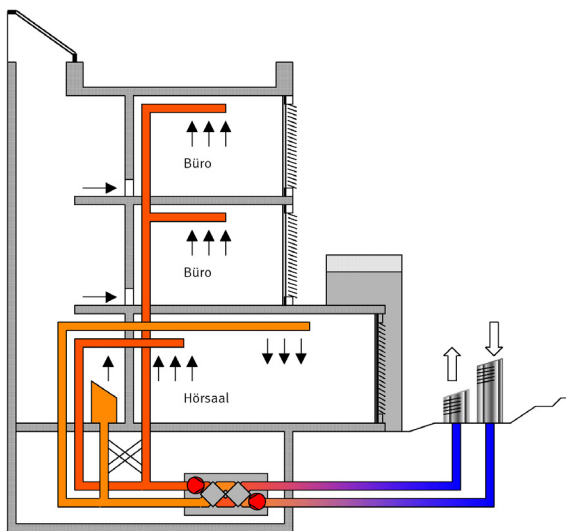
## 6. Bauteilheizung/-Kühlung

Innerhalb der zweijährigen Datenerfassung wurde die Betriebsweise der Bauteilaktivierung variiert. Im ersten Bezugsjahr wurden das Fußboden/- und Betonsystem parallel betrieben, in der zweiten Heizperiode wurde ausschließlich über das Fußbodensystem

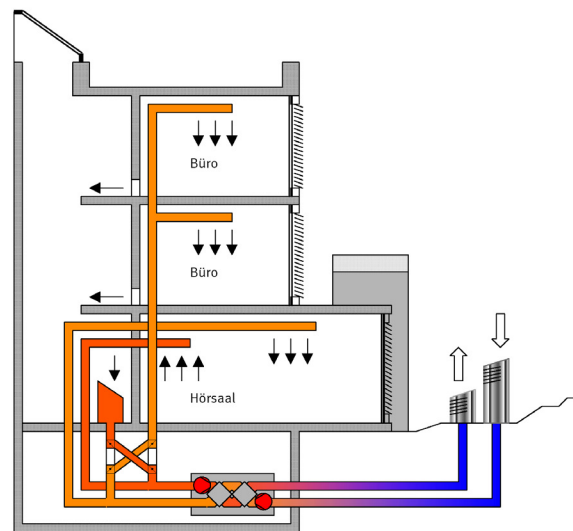
geheizt. Es konnte kein energetischer Vorteil einer der beiden Betriebsarten nachgewiesen werden, hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit ergaben sich keine belegbaren Unterschiede. Die maximale abgefragte Leistung, welche pro Büroraum über das Heizsystem zur Verfügung steht, beträgt  $80 \text{ W/m}_2$ . Für den Kühlfall war zunächst ein Wechsel zwischen Betonkernaktivierung und Fußbodenkühlung vorgesehen. Wegen der hohen thermischen Masse des Betonsystems und der niedrigen zur Verfügung stehenden Kühlleistung über die Sohlplatte konnte der Betonkern nicht gekühlt werden; aus diesem Grund wurde ausschließlich über das Fußbodensystem gekühlt. Die maximal erreichte Kühlleistung beträgt rd.  $40 \text{ W/m}_2$ .

## 7. Mechanische Lüftung

Im Institutsgebäude ist ein Lüftungskonzept realisiert, welches sowohl die mechanische Be- und Entlüftung (im Zu- und Abluftbetrieb, s. Bild 3 und 4) als auch das Lüften über Fenster erlaubt.



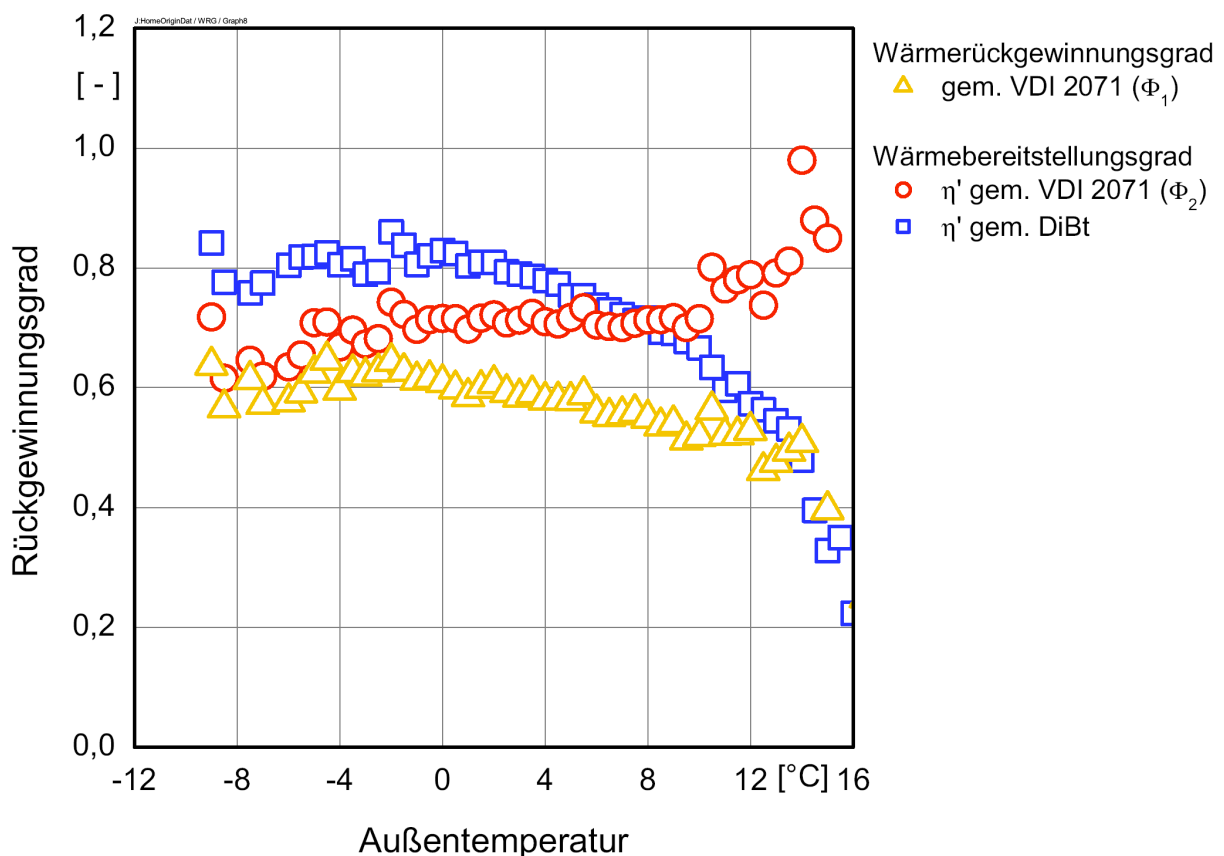
**Bild 3:** Betriebsart Abluftbetrieb.



**Bild 4:** Betriebsart Zuluftbetrieb.

Kernstück der mechanischen Lüftung ist eine Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung über zwei in Reihe geschalteten Plattenwärmetauschern, welche je nach Bedarf den Büroteil, Büroteil und Hörsaal oder den Hörsaal exklusiv belüften kann. Der Volumenstrom wird mittels Drehzahlregelung an Hand der Luftqualität in den einzelnen Räumen variiert. Mit Hilfe der Lüftungsanlage ist es im Büroteil des Gebäudes zu jeder

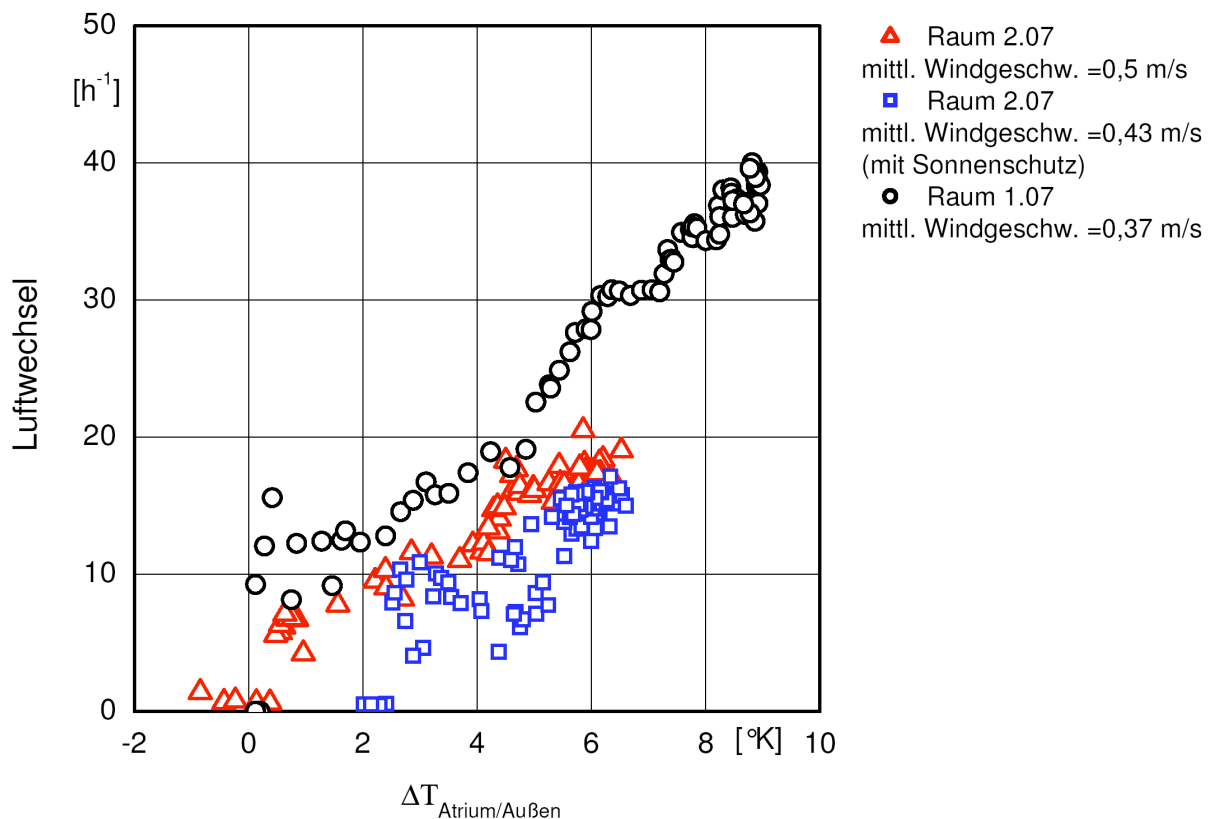
Zeit gelungen, die geforderten Luftqualitäten sicherzustellen. Im Hörsaal konnten bei voller Belegung die Grenzwerte für CO<sub>2</sub> teilweise nicht eingehalten werden. Ursache hierfür ist die Begrenzung der Volumenströme auf ca. 4000 m<sup>3</sup>/h, ein Kompromiss aus den energetischen Anforderungen und der Lüftungsintensität, welcher sich jedoch in der Praxis als unproblematisch erwiesen hat. Die Bewertung gemessener Mischgaskonzentrationen bleibt jedoch schwierig. Obwohl laut Nutzerbefragung die Luftqualität teilweise als unbefriedigend eingestuft wird, zeigt die messtechnische Vergleichsgröße gleich bleibend gute Luftqualitäten. Der gemessene Wärmebereitstellungsgrad der WRG beträgt rd. 80% (Bild 5). Der Beitrag der zurück gewonnenen Wärme am Heizwärmebedarf beträgt 15,5%. Mit Hilfe der Drehzahlregelung und der bedarfsgeführten Luftwechsel konnte der Stromverbrauch der Anlage mit rd. 120 kWh/mon deutlich gesenkt werden. Ohne Bedarfsregelung belief sich der Stromverbrauch auf rd. 640 kWh/mon.



**Bild 5:** Mittlerer Wärmerückgewinnungsgrad und Wärmebereitstellungsgrad, aufgetragen über die klassierte Außentemperatur.

## 8. Fensterlüftung und nächtliche Entwärmung

Während der Sommermonate wird, wie vorgesehen, das Gebäude fast ausschließlich über Fenster gelüftet. Nur bei Nutzung des Hörsaals und für die Durchspülung des Gebäudes mit Frischluft in den frühen Morgenstunden kam die mechanische Lüftung zum Einsatz. In der Heizzeit wurden die Fenster kaum geöffnet. Die Wirkung einer intensiven Nachtlüftung zur Abfuhr von Wärme an hochsommerlichen Tagen wird unter Berücksichtigung verschiedener Lüftungsstrategien untersucht. Gute Ergebnisse wurden mit einer Durchströmung der Räume erzielt, wobei die Luft durch die geöffneten Bürofenster und Türen über die geöffneten RWA-Klappen im Atrium nach außen gelangt. Es wurden in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz von Außenluft und Atrium bis zu 40-fache Luftwechsel gemessen (Bild 6).



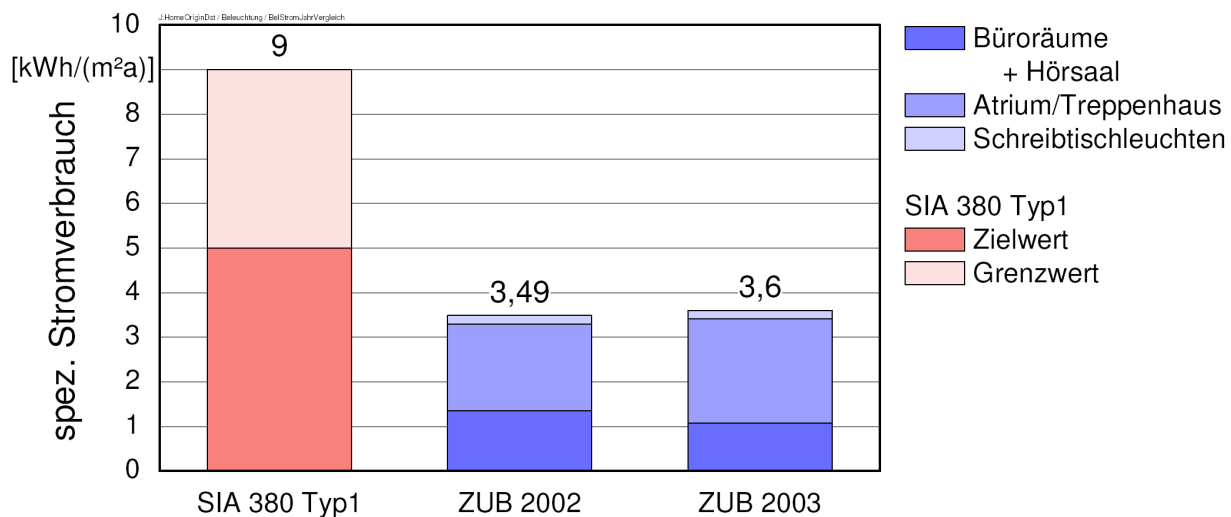
**Bild 6:** Gemessene Luftwechsel in den Räumen 1.07 und 2.07 in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Treppenhaus und Außenluft. Jeder Punkt repräsentiert den Mittelwert über 10 Min.

In der Versuchszeit konnte für die betreffenden Räume eine Abkühlung um 6 K erreicht werden. Die Nutzung des heruntergelassenen Sonnenschutzes als Schlagregenschutz hat dabei praktisch keine mindernden Auswirkungen auf den Luftwechsel. Die Nutzung

der Lüftungsanlage für die Nachtlüftung als hybrides oder alleiniges System, liefert keine befriedigenden Ergebnisse, da die förderbaren Volumenströme nicht für eine nächtliche Entwärmung ausreichen. Die Kombination geöffnete Fenster bei geschlossenen Bürotüren und geöffneten RWA-Klappen blieb hinsichtlich der Luftwechsel ebenso hinter Erwartungen zurück. Die relativ hohen Druckverluste der Überströmöffnungen in den Türleibungen zeichnen hierfür verantwortlich.

## 9. Beleuchtung

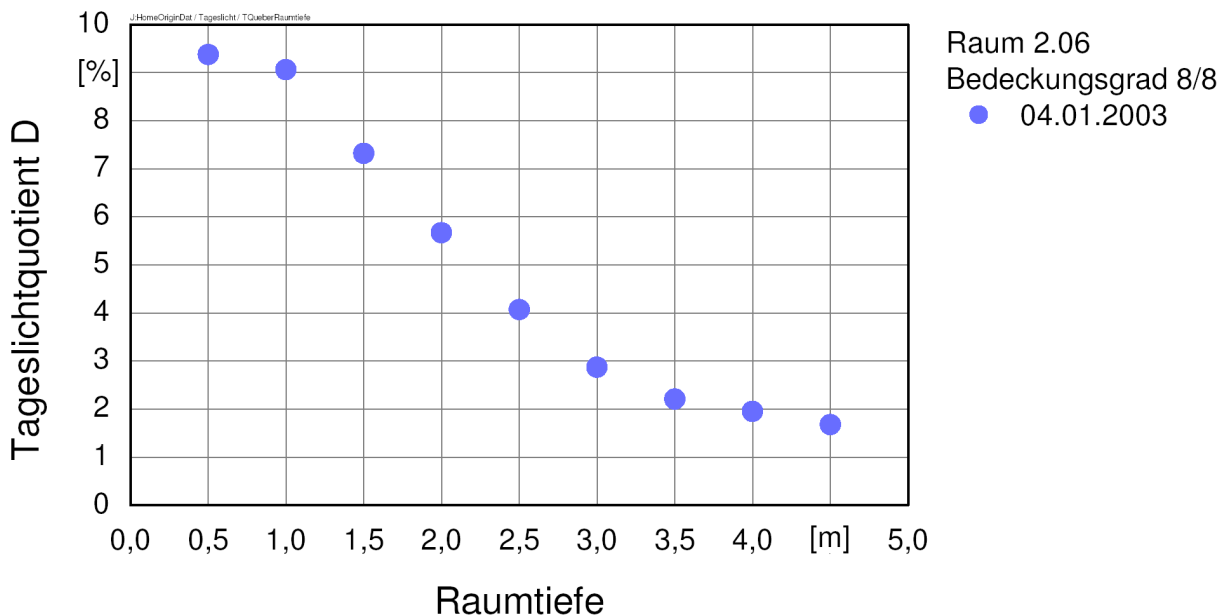
Das umgesetzte Beleuchtungskonzept umfasst eine hohe Ausnutzung des Tageslichts sowie den Einsatz von einer tageslichtabhängigen Beleuchtungsstärkeregelung. Dadurch ist es gelungen, den Stromverbrauch für die künstliche Beleuchtung im Durchschnitt auf  $3,5 \text{ kWh}/(\text{m}_a)$  zu begrenzen (Bild 7). Hierbei beträgt der spezifische Stromverbrauch für die Bürobeleuchtung rund ein Drittel des gesamten Beleuchtungsstromverbrauchs. Im Büroteil des Gebäudes gibt es überwiegend tageslichtorientierte Arbeitsplätze, welche in unmittelbarer Fensternähe gemäß DIN 5035-2 eine Nennbeleuchtungsstärke von  $300 \text{ lx}$  aufweisen müssen. Die gemessenen Kunstlicht-Beleuchtungsstärken an einem Arbeitsplatz liegen zwischen  $300$  und  $350 \text{ lx}$ . Die in der Raumtiefe gemessenen Beleuchtungsstärken variieren um die  $200 \text{ lx}$ .



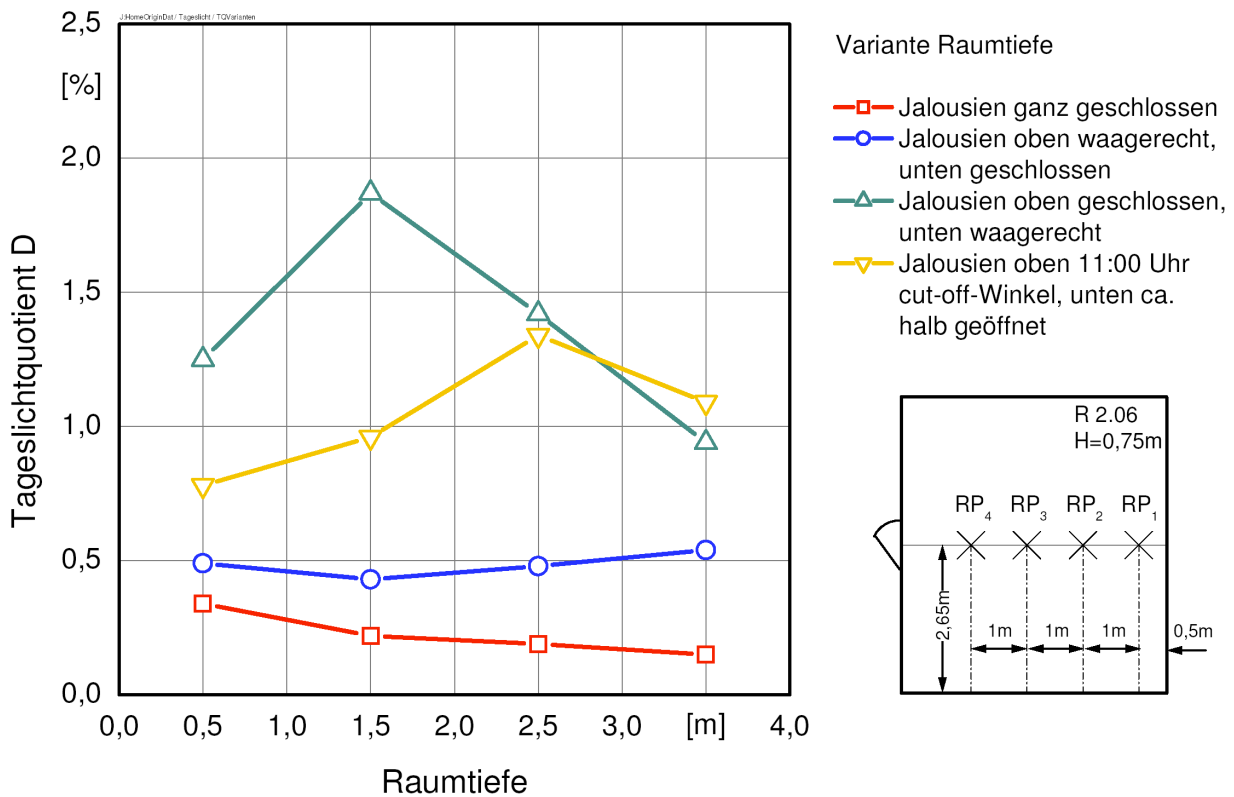
**Bild 7:** Jährlicher spezifischer Stromverbrauch der künstlichen Beleuchtung im ZUB für die Jahre 2002 und 2003 im Vergleich zu den Anforderungen der Schweizer Richtlinie SIA 380.

## 10. Tageslichtnutzung

Die bei völlig bedecktem Himmel gemessenen Tageslichtquotienten bewegen sich in Fensternähe um rd. 9% und nehmen zur fensterabgewandten Seite hin kontinuierlich ab. Die dort gemessenen Tageslichtquotienten unterschreiten 1,7% nicht (Bild 8) und liegen damit weit über den Anforderungen der DIN 5054-2 (min. 0,9% in der Raumtiefe). Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass der Reflexionsgrad der den Raum umgebenden Flächen nur einen geringen Einfluss auf den Tageslichtquotienten hat. Den größten Einfluss auf die Höhe und Verteilung gemessener Tageslichtquotienten hat die Stellung des Sonnenschutzes. Komplett geschlossene Jalousien führen zu Tageslichtquotienten von unter 0,5% über die gesamte Raumtiefe. Höhere Werte lassen sich bei Einsatz eines geteilten Sonnenschutzes erreichen, wobei sich für die Beleuchtung des Arbeitsplatzes mit ca. 1,8% dann die höchsten Werte erreichen lassen, wenn die Lamellen im oberen Bereich geschlossen sind und im unteren Bereich waagrecht stehen (Bild 9).



**Bild 8:** Verlauf des Tageslichtquotienten über der Raumtiefe an einem völlig bedeckten Tag in Raummitte (Fenster ohne Sonnenschutz).

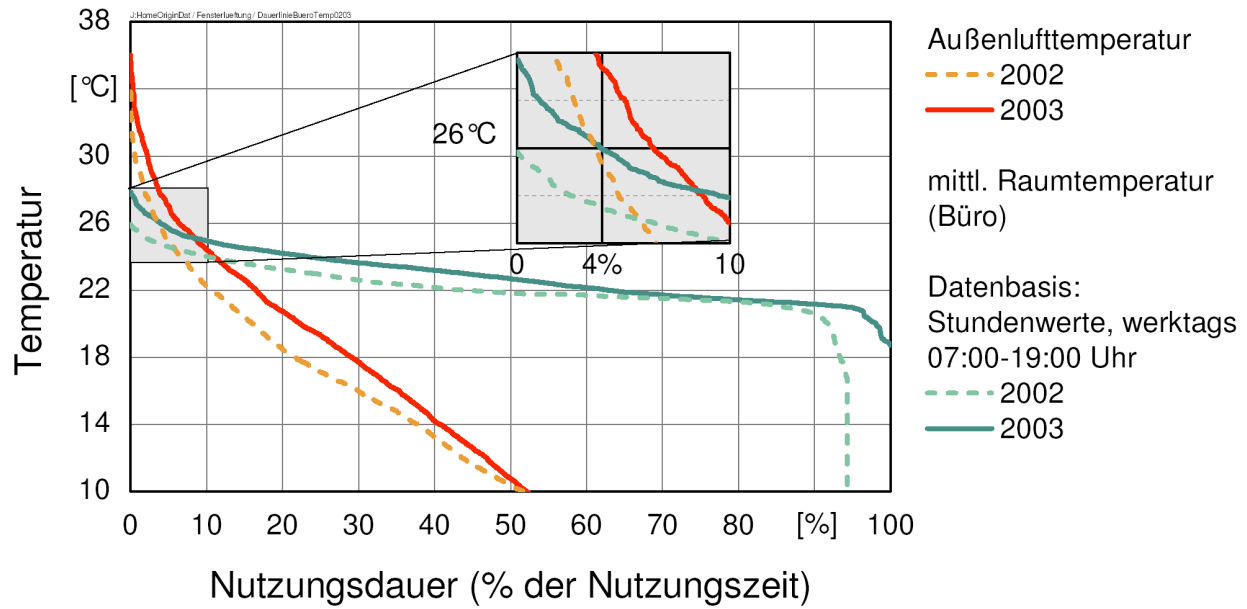


**Bild 9:** Tageslichtquotient in Abhängigkeit von der Raumtiefe bei heruntergefahrter Außenjalousie mit unterschiedlicher Positionierung der Lamellen.

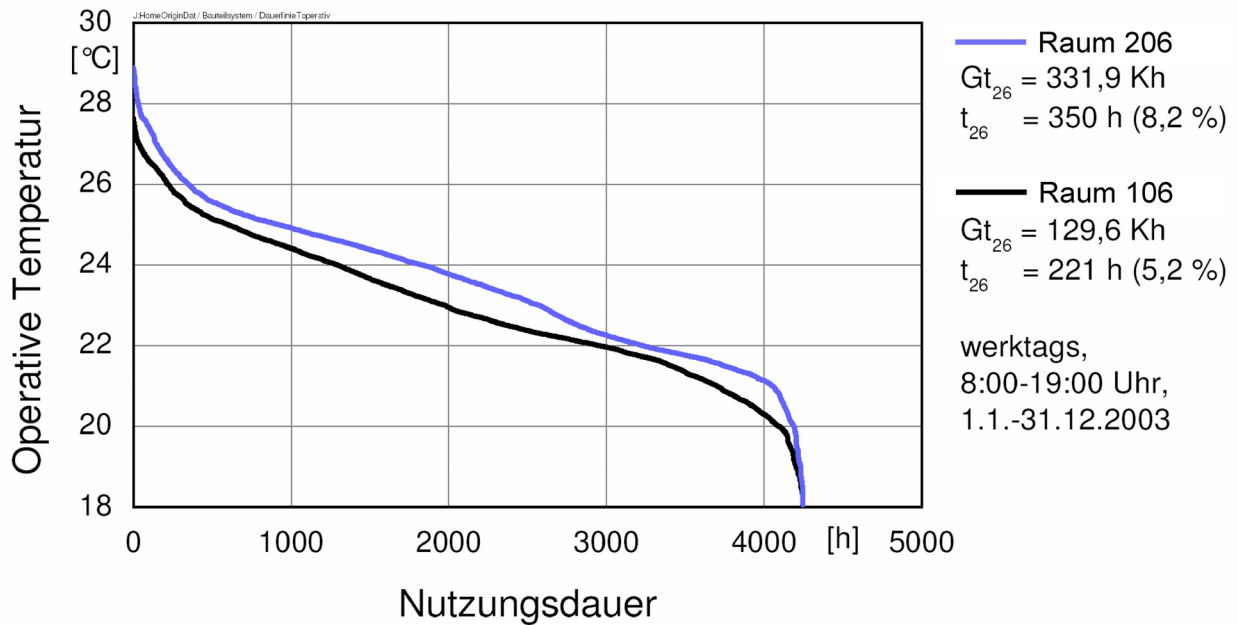
## 11. Behaglichkeit

Neben den hohen Anforderungen hinsichtlich der energetischen Effizienz des Gebäudes wurde während der Planung dem thermischen Komfort besonderes Augenmerk geschenkt. Besonderes Interesse gilt den raumklimatischen Bedingungen im Sommerbetrieb und dort vor allem, ob die Kombination eines effektiven Sonnenschutzes mit einer passiven Bauteilkühlung ausreicht, um auch bei hochsommerlichen Außenlufttemperaturen behagliche Raumlufttemperaturen zu gewährleisten. Während der Wintermonate ist es zu jeder Zeit gelungen, behagliche Raumluftzustände zu erreichen. Die über alle Heizperioden gemittelte Büroraumtemperatur ist mit rd. 22°C relativ hoch (Bild 10). Die Ursache hierfür liegt in der Nutzung der solaren Strahlung über die verglaste Südfassade. Bei geringen Einstrahlungen findet man mittlere Temperaturen (während der Nutzungszeit Mo - Fr, 8:00 - 19:00 Uhr) in Höhe von ca. 21°C, welche stetig mit größer werdenden solaren Einstrahlungen bis auf über 23°C ansteigen. Die Stellung des manuell betätigten, außen liegenden Sonnenschutzes bildet hierbei den größten Einfluss-

faktor. Die für die Bewertung des thermischen Komforts in den Sommermonaten herangezogenen Übertemperaturgradstundenzahlen liegen trotz der schwierigen klimatischen Randbedingungen im „Jahrhundertsommer“ 2003 in einem akzeptablen Bereich. Es werden Übertemperaturgradstundenzahlen mit einem Minimum von 4,5 Kh/a bis zu einem Maximum von 529,9 Kh/a ermittelt. Der Mittelwert liegt bei rd. 145 Kh/a, der Maximalwert ist im Experimentalbereich des 2ten OG zu finden und begründet sich durch die fehlende Bauteilkühlung in Kombination mit einem stets geöffneten Sonnenschutz. Der Vergleich aller übrigen Räume mit der so gefundenen Referenz bestätigt das positive Zusammenwirken einer passiven Bauteilkühlung niedriger Leistung mit einem außen liegenden Sonnenschutz. Die gefundenen Werte  $Gh_{26}$  lassen einen Zusammenhang der Lage sowie der Belegung und Ausstattung der einzelnen Büros erkennen. Büroräume im östlichen Teil des Gebäudes neigen deutlich häufiger zu Überhitzungen als Räume im Westteil. Bei Räumen mit einer hohen Geräteausstattung ist ebenfalls ein höheres Überhitzungsrisiko zu verzeichnen. Das Gleiche gilt für Büros im 2ten Obergeschoss im Vergleich zu denen im Erdgeschoss. Genauere Messungen in den beiden Messbüros bestätigen die Funktion aller Komponenten zur Vermeidung von Überhitzungen. Die nach DIN 1946-2 vorgegebene Begrenzung des Lufttemperaturgradienten auf 2 K, gemessen in verschiedenen Höhen, wird in beiden Büros auch in der hochsommerlichen Phase eingehalten. Die Übertemperaturgradstundenzahlen, welche für die Messräume gemäß Definition mit Hilfe der operativen Temperatur gebildet werden, betragen 129,6 und 331,9 Kh/a (Bild 11). Der höhere Wert des Raumes im 2ten OG kommt durch die niedrige zeitliche Belegung und des dadurch häufiger hochgefahrenen Sonnenschutzes zustande.



**Bild 10:** Jahresdauerlinien der gemittelten Bürottemperaturen im Jahr 2002 und 2003. Hervorgehoben sind Bereiche mit Raumtemperaturen größer 26 °C.



**Bild 11:** Dauerlinie der operativen Raumlufttemperaturen in den Messbüros R 1.06 und R 2.06 während der Nutzung (Jahr 2003).

## 12. Fazit

Das Forschungsvorhaben zeigt, dass die hohen Anforderungen an ein Nichtwohngebäude hinsichtlich der energetischen Effizienz sowohl im Bereich der Beheizung und Kühlung, als auch in Bezug auf eine rationelle Stromverwendung erreicht werden können. Die zweijährige Evaluierung des Demonstrationsgebäudes liefert den Beleg dafür, dass mit einer ganzheitlichen Betrachtungsweise aller Gewerke und der konsequenten Umsetzung der geplanten Konzepte Gebäude errichtet werden können, die sowohl energetisch als auch unter Komfortgesichtspunkten zukunftsweisend sind. Die Kombination eines hoch wärmegeprägten, solar optimal ausgerichteten Baukörpers mit einem Bauteilheizsystem und passiver Kühlung stellt das Grundgerüst für das solar optimierte Bauen dar. Der Einsatz einer Sohlplattenkühlung ist insbesondere dann sinnvoll, wenn durch weitere Maßnahmen die internen und externen Lasten beschränkt werden können. Mit dem Einsatz eines außen liegenden Sonnenschutzes sowie einer stromsparenden Geräteausstattung ist dies insoweit gelungen, dass zu jeder Zeit behagliche raumklimatische Verhältnisse hergestellt werden konnten. Das umgesetzte Lüftungskonzept, das im Winterbetrieb eine mechanische Lüftung und im Sommer die Fensterlüftung vorsieht, hat sich während der gemessenen Betriebsjahre bewährt. Der Stromverbrauch der Anlage konnte durch den Einsatz von VOC-Sensoren in Kombination mit drehzahl-geregelten Ventilatoren deutlich gesenkt werden.